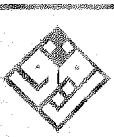
المجلس الأعلى للثقافة



المشروع القومى للترجمة

الهيولية تصنع علما جديدا

تأليف جيمس جلايك

ترجمة على يوسف على

المشروع القومى للترجمة

الهيولية
تصنع علماً جديداً

تأليف
جيمس جلايك

ترجمة
على يوسف على



٢٠٠٠

CHAOS
Making a New Science

JAMES GLEICK

تنويه حول اسم الكتاب

اختلفت الآراء حول وضع مصطلح لعلم Chaos، فذهب رأى إلى ترجمته "علم الفوضى"، استجابة للترجمة الحرفية للمصلح، وهو ما يرفضه المترجم رفضا قاطعا، حيث يجمع المصطلح بين المفهوم ونقيضه. فكما سوف يدرك القارئ الكريم، لقد قام هذا العلم الجديد لينفى صفة الفوضى عن ظواهر الطبيعة، ووضع اسم للعلم يحمل معنى ما يريد أن ينفيه أمر لا تقبله مبادئ علم المصطلح. ولعل أبلغ دليل أقدمه أن نفس الاعتراض ثائر فى الغرب على مصطلح Chaos ذاته، كما سيرد فى الفصل التاسع من هذا الكتاب، والذى أسبق الحوادث وأقتبس الجملة الآتية منه: "اعتبر جون هبارد مصطلح chaos اسما فقير التعبير، لكونه يعنى ضمنيا الهيولية، بينما رسالة العلم الجوهرية هى أن الطبيعة تنتج بعمليات بسيطة صروحا هائلة من التعقد دون فوضى أو عشوائية".

الاقتراح الثانى هو "علم الشواش"، ويعيبه أن علم الهيولية يفرق بين الانتظام والتشويش، ومن ثم فإن نفس الاعتراض قائم فى حق هذا الاقتراح.

ولهذه الأسباب يقترح المترجم مصطلح "الهيولية"، على أساس أنه المقابل لمصطلح chaos فى التراث العربي، ولكن ليس بمعنى الفوضى، ولكن بمعنى "المادة الأولية للكون"، وبالتالى فإن المصطلح العربى مبرأ من الاعتراضات التى ترد على الاقتراحات التى تحمل معنى الفوضى أو العشوائية. ويسعد المترجم أن حاز الاقتراح قبول شخصيات لها وزنها فى تعريب العلوم، هم الأساتذة الدكاترة "بالترتيب الأبجدى للأسماء" أحمد شوقي، أحمد مستجير، جابر عصفور، سمير سرحان، محمد عناني، وعلى ذلك سارت الترجمة فى كتابى "أفكار العلم العظيمة" و"أسطورة المادة" من إصدارات الهيئة المصرية العامة للكتاب.

تنفيذ وطباعة: Stampa
تليفون: ٢٤٤٦٨٧٣ - ٢٤٦٠٢٤٤

تعريف بالمؤلف

ولد جيمس جلايك فى مدينة نيويورك ويعيش هناك مع زوجته سينثيا كروسن. وهو مؤلف كتاب "النابغة، أعمال وعلم ريتشارد فاينمان".

تعريف بالمترجم

المهندس على يوسف علي، من مواليد الشرقية عام ١٩٤٠ حاصل على بكالوريوس الهندسة الكهربائية قسم الاتصالات من كلية الهندسة جامعة الاسكندريةعام ١٩٦٢ وماجستير القانون من كلية الحقوق جامعة القاهرة عام ١٩٨١ ودبلوم الترجمة من كلية الآداب جامعة الاسكندرية عام , ١٩٩٠ بدأ حياته العملية بالتعليم الصناعى ثم عمل بمشروع السد العالى ثم فى قطاع الكهرباء، وآخر منصب وصل إليه قبل التقاعد للتفرغ للترجمة فى مارس عام ١٩٩٨ هو رئيس قطا ع الاتصالات بشركة كهرباء البحيرة.

له العديد من الكتب المترجمة فى مجال المعلوماتية وتبسيط العلوم والروايات الأدبية، كما ساهم فى ترجمة الموسوعة الإسلامية والموسوعة العلمية للناشئة (تحت الطبع) الصادرة من الهيئة المصرية العامة للكتاب. ساهم فى المشروع القومى للترجمة بكتاب "ما وراء العلم".

شكر وتقدير

يتقدم المترجم بالشكر العميق لكل من قدم له يد العون والتشجيع على ترجمة هذا الكتاب، ويخص بالشكر نيابة عن الجميع السيد الوالد الكريم، أمد الله فى عمره، على قيامه بالتصحيح اللغوى وإبداء الملاحظات الأسلوبية القيمة، والأستاذ الدكتور أحمد مستجير الذى كان تشجيعه زادا معنويا لا ينكر أثره، وللسيدة زكية عبد المنعم عبد السلام مساعدة أمين مكتبة الجامعة الأمريكية على تقديم العون فى الاطلاع على مراجع المكتبة المرتبطة بالموضوع، والزميل المهندس عادل عبد الجواد خبير الحاسبات، والأستاذ رأفت الفرماوى على قيامه بالقراءة النهائية للكتاب وعلى ملاحظاته القيمة التى بها أخرج فى صورته النهائية، وأخيرا إلى الحفيدتين الغاليتين سارة ومريم، إذ كانت زيارتهما فى الولايات المتحدة سببا فى الاطلاع على هذا العلم والحصول على هذا الكتاب.

إهداء

إلى كل من أضاء
شمعة، بدلاً من أن
يلعن الظلام

مقدمة المترجم

بسم الله. والصلاة والسلام على رسول الله.

القارئ الكريم ... ...

الهيولية علم جديد، ربما لم يسمع عنه بعد الأكثرية من قراء العربية. وهو علم ينتمى من الوجهة الرسمية للرياضيات، فهو فرع من فروعها[1]. وبينما تنقسم الرياضيات عرفا إلى بحتة وتطبيقية، فهذا الفرع الحديث يجمع بين الجانبين. وفى جانبه التطبيقي، لم يترك مجالا علميا إلا وقد اقتحمه، وإليك عزيزى القارئ قائمة عامة للعلوم التى يعرض لها الكتاب فى حديثه عن هذا العلم الوليد:

- الرياضيات البحتة
- الفيزياء
- علم النفس
- الاقتصاد
- الفلك
- الطب
- الجيولوجيا
- الاتصالات
- علم الزلازل
- البيولوجيا والعلوم البيئية

وليس فى هذا من عجب، لو علمت عزيزى القارئ المجال الأصلى الذى يتناوله هذا العلم، فهو يبحث ببساطة فى النظم الديناميكية، وهى النظم التى تتغير عوامل بها، فتتغير نتائج طبقا لها. وبنظرة سريعة، نجد أنه ما من علم من العلوم المذكورة إلا ويتضمن ظواهر ديناميكية، الطب فى ضربات القلب، وعلم النفس فى نبضات المخ، والاتصالات فى الإشارات المنقولة حاملة للمعلومات، والاقتصاد فى تأثر الأسواق بآليات السوق، على ذلك بقية العلوم بلا استثناء.

ومن الظواهر الديناميكية ما قتل بحثا، ومنها ما لم يفهمه أحد من قبل. فقد اتضح أن انتشار الأوبئة، والزلازل، وتقلبات البورصة، تسير على أنساق لم يعرف لها سبب. وفى كلتا الحالتين، فإن لعلم الهيولية دورا خطيرا فى سبر أغوار هذه النظم. على أن النظم الديناميكية تخضع لقوانين قد اكتُشفت منذ أمد، وقد عهدنا فى العلم أنه يهتم

بالظواهر المنضبطة، يضع لها القوانين والنماذج الرياضية التى تمكن من فهمها، ومن التنبؤ بها.

ولكن النظم الديناميكية لا تسير على الدوام سيرا حسنا فى الخضوع لهذه القوانين، فلسبب أو لآخر تنتابها الفوضوية العشوائية. فى هذه الحالة، فإن العلم يقف عاجزا مكتوف اليدين. وما زالت ذاكرتى تعى إلى اليوم قول أستاذ علم الهيدروليكا لنا فى الصف الثالث من كلية الهندسة، وكان ذلك عام ١٩٦٠، عما يسمى vortex motion، وهى حركة المياه الدواميّة حين تهبط فى فوهة بالوعة، حيث قال أنها لم تحلل علميا حتى الآن.

وكان موقف العلماء مما يبدو للنظم من خروج عن المنضبط علميا هو أن يعزى ذلك لأسباب خارجة عن النظام، كتداخل من أسباب خارجية، أو عدم دقة فى أجهزة القياس، ومن ثم فهى خارجة عن التحليل العلمى للمجال، وكفى الله المؤمنين القتال. إلى أن قيّض الله للعلم أفرادا لم يرضوا بهذا الموقف السلبى من عشوائية الطبيعة، فأصروا أن يخوضوا غمارها، وانتهجوا فى ذلك مسالك شتى، كل بحسب تخصصه وخلفيته العلمية. وشيئا فشيئا تكشّفت لهم أسرار وخبايا تأسر اللُّب وتسحر الخيال.

تعلم روّاد هذا العلم أولا أن ما نعتقده فى مظاهر الطبيعة من عشوائية، إنما هى فى الواقع عشوائية زائفة، ففى أعماقها صور من الانضباط تأخذ باللب. وقد ولد علم الهيولية لينفى هذا النوع من الجهل، الجهل بهذا الانضباط الرائع الكامن فى أعماق الطبيعة، والتى تخطئه العين السطحية.

وعلى هذا الأساس فرّق رواد هذا العلم بين الحوادث الصدفية البحتة random processes، كخلط أوراق اللعب أو خطوات شخص ثمل، وبين الظواهر الطبيعية التى تتأبى على التحليل العلمى التقليدى وتستعصى بالتالى على التنبؤ. فهذه الأخيرة تظل خاضعة للقوانين البسيطة التى تحكمها، ومن ثم فإن عشوائيتها المزعومة تكون قابلة للتحليل العلمي، وهذا ما نهض هؤلاء الرواد للقيام به، وأطلقوا على هذه الحالة مصطلحا يليق بها، "chaos، أو الهيولية".

لقد وجدوا أن الظاهرة التى تنزع للهيولية، إنما تفعل ذلك وهى تحت سيطرة قوانينها الأولية، فهى لم تتمرد عليها البتة، بل هى "منجذبة" إليها، فكان ذلك إيحاءً بوضع مفهوم جوهرى فى فهم مسالك الطبيعة فى هيوليتها، مفهوم "الجاذب الغريب strange attractor" الذى يمثل قلب التحليل الهيولي، ولن يدخر المؤلف وسعا فى بيان هذا المفهوم.

وتعلّم روّاد علم الهيولية أن السبب فى نزوع الطبيعة إلى صور التعقد فى ظواهرها قد تعزى أحيانا إلى تداخل العوامل بصورة تستعصى على التقصي، كما فى حالة التنبؤ بالطقس، حيث قد يؤدى تغير طفيف للغاية إلى تأثيرات ضخمة يصعب التنبؤ بها، وقد أطلقوا على هذه الحقيقة مصطلحا طريفا: "ظاهرة الفراشة"، ويقصد به الحساسية المفرطة للتغير فى العوامل الأولية المؤثرة فى الظاهرة، والتى هى موضوع الفصل الأول من الكتاب.

كما يكون التعقد بسبب تداخل النتائج مع المسببات، وهو ما يسمى اصطلاحا "التغذية الخلفية feedback"، فسرعة الجسم تتأثر بالقوى المؤثرة عليه، ومنها الاحتكاك. فإذا علمنا أن الاحتكاك بدوره يعتمد على السرعة، فإننا ندرك معنى التأثير المتبادل بين العوامل والنتائج، الاحتكاك يؤثر فى السرعة ويتأثر بها فى نفس الوقت. يقول علماء الرياضيات للتعبير عن ذلك أن النظام يخرج عن "العلاقة الخطية linear relation" ويقصدون بذلك العلاقة السلسة المفهومة بين المسببات والنتائج، أو بين المدخلات والمخرجات، إلى أن تكون "غير خطية non-linear". وإذا زاد معدل الارتباط بين المؤثرات والمتأثرات (معدل اللاخطية nonliearity) عن قدر معين، فإن ذلك يؤدى إلى ظاهرة الهيولية، ولهذا السبب فإن الإسم المرادف لهذا العلم هو "النظم الديناميكية غير الخطيّة nonlinear dynamic systems".

ثم تعلّم رواد هذا العلم أن قواعد التحليل الهيولى chaotic analysis للنظم الديناميكية عامة لكافة النظم الديناميكية بصرف النظر عن المجال العلمى الذى تخضع له، وكانت هذه العمومية universality من أكثر اكتشافات العلم الحديث إثارة. إن الربط بين اضطرابات القلب والتشويش فى قنوات الاتصالات، أو بين انتشار الأوبئة وانهيار البورصات المالية، أمر لم يكن يحلم به حالم من بعد، مهما بلغ خياله من اتساع. ولذا ليس من المستغرب ما قوبل به رواد علم الهيولية الأوائل من إنكار واستنكار، حتى قال أحدهم بعد محاضرة ألقاها: "أعلم أنهم لم يفهموني، ولكن الذى لم أفهمه، لماذا كان كل هذا العداء؟"

ولقد كان للحاسوب الفضل الأكبر فى تمكين هؤلاء الرواد من المضى فى سبر أغوار الهيولية واستكشاف مجاهلها، فلولاه ما أمكن ذلك، هذا لأن الهيولية إنما تنشأ بسبب تكرار لعلميات بسيطة وبدائية، ولكن لملايين المرات، مما يجعل العين المجردة تخطئ النظام الكامن فى النتائج. ولهذا السبب فقد لعب الحاسوب بالنسبة للرياضيات دورا طريفا، فقد حولها إلى علم تجريبي، كان الحاسوب فيه أشبه بجهاز الفيزيائى أو

مجهر البيولوجى أو قارورة الكيميائي، بعد أن ظلت لقرون عدة علما تجريديا بحتا يترفع عن أن يهبط إلى مستوى العلوم التجريبية كالفيزياء والكيمياء والبيولوجيا. لقد قاوم الرياضيون التقليديون هذا الاتجاه طويلا، ولكن رواد الهيولية رحّبوا به، ووجدوا فيه فتحا مبينا للعلم فى مساره الجديد.

لقد خاض مؤسسو علم الهيولية دربا غاية فى الوعورة، فصدقهم الله وعده ألا يضيع عمل المحسنين، ويكفيهم اليوم فخرا، بعد أن أحنى الكل أخيرا رؤوسهم لهم إجلالا، أن إليهم تنسب الثورة العلمية الثالثة فى القرن العشرين، بعد ثورة النظرية الكمية والنظرية النسبية.

المترجم

مهندس/ على يوسف على

محتويات الكتاب

الموضوع	الصفحة

---

i إذا عنّ لأحد القراء الأعزاء أن يبحث عن الموضوع على شبكة الإنترنت، فيكون ذلك تحت عنوان الرياضيات–المترجم

ii كم ساءنى أن أعلم أن البعض قد ترجم هذا المصطلح بـ "علم الفوضى"، ويعلم الله والراسخون فى العلم أنه ما هو بفوضى، ولكنه عدم الإحاطة بخبايا هذا العلم الرائد. أما السبب فى اختيار هذا المصطلح فهو أنه مستخدم فى التراث العربى بالفعل كمقابل لكلمة chaos، فيقول شوقى فى كتابه "شذور الذهب" مخاطبا المنكر لوجود الله:: "قد علمنا الهيولا، ولكنا لم ننكر اليد الطولى". ويقصد بالهيولا (أو الهيولي) فى هذا السياق المادة الأولى للكون.

كما يسعدنى أن يوافقنى على اختيار المصطلح العربى المقابل "الهيولية" الأساتذة الأجلاء أحمد مستجير ومحمد عناني، ولهما فى الترجمة المكانة التى لا يجهلها أولو العلم، وقد استخدمت نفس المصطلح فى ترجمة كتاب "أسطورة المادة" من إصدارات الهيئة المصرية العامة للكتاب – المترجم.

مقدمة المؤلف

فى عام ١٩٧٤ انتاب رجال الشرطة فى بلدة **لوس ألاموس** Los Alamos بولاية نيومكسكو شيء من القلق بخصوص شخص دأب على التسكع فى طرقات البلدة ليلاً، يضرب فى أرجائها على غير هدى، يتجاوب ضوء سيجارته مع وميض النجوم المتلألئة. ولم يكن رجال الشرطة هم الوحيدون الذين انتابهم العجب، فقد علم بعض باحثى المعمل الوطنى بالمدينة أن أحدث زميل لهم يعمل فى أبحاثه طبقا لجدول زمنى قوامه يوم ذو ست وعشرين ساعة، بحيث سيؤدى عدم التوافق بين يومه ويومهم إلى أن تتداخل ساعات صحوه مع أوقات نومهم. لقد بدا الأمر غريبا حتى على قسم الأبحاث النظرية.

على مدى ثلاثة عقود منذ أن اختار **روبرت أوبنهايمر** Robert Oppenheimer هذه المنطقة غير الشهيرة من ولاية نيومكسكو لمشروع إنتاج القنبلة الذرية اتسع نطاق "**المعمل الوطنى بلوس ألاموس** Los Alamos National Laboratory" ليشغل منطقة شاسعة من هذه الهضبة، ضاماً إليه المعجلات الذرية، وأجهزة الليزر الغازية، والمعامل الكيمائية، ومع هذه الأجهزة والمُعدّات الآلاف من الباحثين والإداريين والفنيين، بالإضافة إلى مبنى يضم أقوى حاسوب معروف وقتئذ. ويتذكر القدامى منهم المبنى الخشبى الذى بُنى على عجل فى أوائل الأربعينيات١، ليكون نواةً لهذا الصرح العلمى الضخم.

إن المعمل يضم فى أقسامه قسم الأبحاث النظرية، وقسم الحاسوب، وقسم الأسلحة، ويُعتبر قسم الأبحاث النظرية درته، إذ يعمل به عدة مئات من الفيزيائيين والرياضيين، يحصلون على مرتبات مغرية، ويعملون فى تحرر من ضغوط التدريس ونشر الأبحاث التى يتعرض لها أقرانهم من الأكاديميين. وكانت أبحاثهم تتميز بالجدة والغرابة، ومن ثم كان من الصعب أن يثير شيء ما استغرابهم.

ولكن "**ميتشل فايجنباوم** Mitchell Feigenbaum" كان حالة شاذة. لم يكن له سوى بحث واحد منشور، ولم يكن يبحث فى موضوع يبدو أنه يبشر بخير. كان شعره يسقط متهدلا فوق جبينه، يشع من عينيه القلق والرقة، وحين يتحدث، كان حديثه سريعا يميل إلى اللكنة الأوربية رغم كونه من أهل بروكلين. كان ينكبُّ على العمل بنشاط محموم، وحين لا يعمل، يسير على غير هدى، ليلا أو نهارا، مع تفضيل الليل

على النهار فى ذلك. كان اليـوم ذو الأربع والعشرين ساعة غير كاف بالنسبة له، على أن تجربتــه مع عـدم التزامــن مع اليوم الطبيعى أجبرته على التخلى عن نظامه اليومى الشاذ.

فى التاسعة والعشرين من العمر اعتُبر مرجعا لزملائه من العلماء، يلجئون إليه - حين يتمكنون من الحصول عليه - فى الشاذ والدقيق من الموضوعات. وصل ذات يوم للمعمل حين كان مديره، "**هارولد أجنيو** Harold Agnew" على وشك مغادرته. كان أجنيو شخصية قوية، عمل كمساعد لأوبنهايمر فى مشروع القنبلة التى ألقيت على هيروشيما. وقد واجه فايجنباوم قائلا: " أعلم أنك على قدر عال من الذكاء، ولكن لو كنت على هذا القدر من الذكاء، لماذا لا تحل مشكلة اندماج الليزر laser fusion؟"

حتى أقرب أصدقاء فايجنباوم كانوا على شك من أن ينتج شيئا ذا قيمة. فهو لم يكن يبدى اهتماماً بأن يُسخِّر أبحاثه لشيء يبشر بعائد ما، رغم ما كان يسحرهم به من إجاباته الإرتجالية. كان يفكر فى الاضطرابات فى السوائل والغازات، وفى طبيعة الزمن، هل يسرى سلسا أم يطفر فى كمّات؟ متتالية كما يحدث للصور السينمائية؟ وفى كيفية رؤية العين للألوان والأشكال، فى عالم يعلم الفيزيائيون أنه لا يعترف بالتحديد القاطع من وجهة نظر النظرية الكميّة. كان يراقب السحب من نافذة طائرة أبحاثه (فى عام ١٩٧٥ سحب منه امتيازات التنقل، على أساس أنه قد تجاوز الحد فى استخدام هذه الميزة)، أو من فوق سطح مبنى المعمل.

فى البلدة الجبلية من الغرب الأمريكي، لم تكن السحب تشبه الغمام الداكن عديم الشكل الذى ينساب على ارتفاع منخفض كما يحدث فى الشرق. ففى لوس ألاموس، تلك البلدة التى تحتضن بركاناً هائلاً، تتناثر السحب عبر السمـاء، فى تكوينات عشوائية، نعم، ولكنها أيضا ليست عشوائية، ثابتة فى تشكيلات إبرية، أو منسابة فى أشكال منتظمة ذات أخاديد تجعلها أشبه بشكل المخ الحيواني. وفى أوقات الأصيل العاصفة، حين تومض السماء بالبرق، تقف السحب على ارتفاع ثلاثين ميلا، ترشح الضوء أو تعكسه.

فى علم الفيزياء، من المقبول أن تعمل فى مجال اندماج الليزر، أو فى خصائص الجسيمات دون الذرية، أو فى البحث عن أصل الكون، أما مراقبة السحب فأمر لم يخطر على بال فيزيائى أن يضعه فى موضع البحث. لقد كان فايجنباوم يعمل، ربما على غير علم لأقرب معارفه، فى مشكلة غاية فى العمق، إنها "الهيولية".

■ ■ ■

وحين تبدأ **الهيولية**، يتوقف العلم التقليدى. ذلك أنه منذ أن بدأ العلماء يبحثون عن القوانين التى تحكم الظواهر الفيزيائية فى الكون، وهم يحجمون تماما عن البحث فى ظواهر الاضطرابات فى الطبيعة الجوية، أو فى التيارات المائية، أو فى التقلبات فى تعداد الكائنات الحية، أو فى اضطرابات القلب أو المخ. إن الجانب غير المنضبط من الطبيعة، الجانب المتقلب والشاذ، كان يحير العلماء، أو بالأحرى يثير الفزع فى قلوبهم.

على أنه فى مطلع السبعينات، عرف فريق من العلماء فى الولايات المتحدة وأوربا والاتحاد السوفيتى كيف يشُقّون طريقا يسبرون به غور هذه الموضوعات. كانوا خليطا من الفيزيائيين والكيميائيين والرياضيين والبيولوجيين وعلماء الاقتصاد، كل يبحث عن روابط تجمع ين الصور المختلفة من الاضطراب العشوائي. لقد وجد الأطباء منهم انضباطاً رائعاً فى اضطرابات القلب العشوائية التى تسبب العديد من حالات الوفاة المفاجئة غير معروفة السبب، ودرس علماء البيئة التقلبات فى تعداد أنواع من الحشرات. وغاص الاقتصاديون فى بيانات البورصة لسنوات طويلة مضت للوصول إلى طريقة أفضل لتحليل تقلُّباتها. إن الأفكار الرائدة قد أدت إلى طريق أفضل لتصوير الطبيعة، السحب فى تكّونها، البرق فى وميضه، أوعية الدم الدقيقة فى تشابكها، والمجرات فى تراكمها.

حين بدأ فايجنباوم فى التفكير فى الهيولية فى لوس ألاموس، كان واحداً من نَفَر من العلماء، غير معروفين فى الغالب لبعضهم البعض. لقد كوَّن رياضيٌّ فى **باركلى** Barkeley بكاليفورنيا فريقا صغيرا للبحث فى النظم الديناميكية بأسلوب مستحدث، وقام عالم فى السكان بجامعة **برينستون** Princeton بنشر التماس مؤثر يدعو فيه العلماء إلى بحث السلوك المعقّد والمدهش الكامن وراء بعض النماذج البسيطة، وكان باحث فى الطبيعة الجوية يعمل فى شركة آى.بى.إم عن كلمة يصف بها علميا الأشكال التى تبدو غير هندسية، بما تضمه من تعرّجات والتواءات وانبعاجات وتهشُّمات، وقام باحث فرنسى فى مجال رياضيات الفيزياء بنشر مقال يتوقع فيه أن تكون الاضطرابات فى التيارات المائية مرتبطة بشيء بسيط مجرد، يتكرر بصور معينة بشكل لانهائى، أسماه "**الجاذب الغريب** strange attractor".

وبعد عقد من الزمان، أضحى لفظ الهيولية اختصارا لاسم حركة علمية تخللت نسيج العلم فى أعماقه. تعددت المؤتمرات وانتشرت المجلات التى تتحدث عن الهيولية. ورصدت الجهات الرسمية المتعددة، مثل تلك المسئولة عن الدفاع وعن الاستخبارات وعن الطاقة، أموالاً لهذه الدراسة وأنشأت الإدارات للإنفاق عليها. ولم تخلُ جامعة أو

مؤسسة علمية محترمة من قسم لدراسة الهيولية، وذهب الكثير من الباحثين إلى تدعيم أنفسهم بأصول هذا العلم الوليد، قبل أن يخوضوا فى مجالهم التخصصي. وفى لوس ألاموس أُنشئ "مركز الأبحاث غير الخطية Center of Nonlinear Studies" للتنسيق بين أصول علم الهيولية والأبحاث الجارية بالمعمل الوطنى.

لقد ابتدع علم الهيولية تقنية خاصة به للتعامل مع الحاسوب، وأشكالا وصوراً تكمن بصورة مدهشة تحت ستار التعقيد، وأفرز العديد من المصطلحات للغة خاصة به، منها towl- fractals, bifurcations, intermittencies, periodicties, folded, deffeomorphisms, smooth noodle maps الخ. وبالنسبة للكثير من العلماء، يُعتبَر علم الهيولية علما للعمليات أكثر منه علما للحالات، يبحث فى كيفية التكون لا فى طبيعة الوجود[iii].

وبعد أن أطلّ هذا العلم برأسه، أصبحت الهيولية تبدو جلية فى كل شيء، فى دخان السجائر حين يصعد فى خط رأسي، ثم يستحيل دوائر متلاشية، وفى خفقان الرايات مع هبوب الريح، وفى تلاطم مويجات الماء بعد أن كانت سيالاً منتظماً. إن الهيولية تبدو فى تقلبات الطقس، وفى اهتزازات الطائرة حين طيرانها، وفى حركات السيارات حين تتزاحم على طريق سريع، وفى دفقات البترول حين يجرى فى أنابيبه تحت الأرض. فمهما كانت تصرفات الوسط الذى تتم دراسته، فهى تخضع لنفس الأنماط التحليلية التى يكشف عنها العلم الوليد. وقد غيرت هذه المفاهيم من نظرة رجال الأعمال لأسباب التقلبات الاقتصادية، ورجال الفلك وهم يرقبون الظواهر الكونية، ورجال السياسة وهم يحللون أسباب الأزمات التى تؤدى للنزاعات المسلحة.

لقد عبر علم الهيولية الحواجز بين العلوم المختلفة، فهو لكونه علما وصفياً يتناول تحليل ظواهر الاضطرابات بصورة مجرّدة، قد ضم رجالاً من مجالات شاسعة التباين فيما بينها. وقد عبّر أحد متخصصى الاقتصاد لمستمعيه ذات مرة عن ذلك قائلا: "على مدى خمسين عاما والعلم يقترب من أزمة الإغراق فى التخصص، ولقد انقلب الأمر بصورة درامية بسبب علم الهيولية." إن هذا العلم يطرح قضايا لا قبِل للطرق التقليدية للعلم بمواجهتها. فهو يتناول بالتحليل العميق ظاهرة التعقد فى صورتها المَجردة. لقد نظر رواد هذا العلم – على اختلاف تخصصاتهم – بحساسية مرهفة لاختلاف الأنماط patterns، خاصة ما تظهر منها على درجات متباينة من الدقة فى نفس الوقت، فاكتسبوا تذوقا خاصا للعشوائية والتعقد، للأحرف غير المستوية والطفرات الفجائية. فالمؤمنون بالهيولية، كما يسمون أنفسهم، يثيرون الجدل حول قضايا مثل **التحديدية**[iv] determinism والإرادة

الحرة والتطور وطبيعة العقل الواعي. إنهم يشعرون بأنهم يقلبون مسار العلم حين ينزع **للتجزيئية** reductionism، أى لتحليل الظواهر إلى أسسها الأولية؛ الكواركات والكروموزومات والنيورونات، فهم ينظرون للظواهر نظرة شمولية.

وينظر لعلم الهيولية على أنه يُمثِّل ثالث ثورة علمية شهدها القرن العشرون، بعد النظرية النسبية والنظرية الكمية، وهو كمثلهما يتمرّد على مبادئ العلم الفيزيائى كما أرساه نيوتن، فكما عبّر عنه أحد الفيزيائيين: "لقد أزالت النسبية أوهام نيوتن حول الفضاء والزمن كمفهومين مطلقين، وأزالت الكمية أحلامه حول التجارب قاطعة الدلالة، وأزالت الهيولية أوهام لابلاس حول قطعية التنبؤات". ومن بين الثورات الثلاث، تتناول الهيولية أشياء فى متناول أيدينا، على مستوى الإدراك البشرى الملموس. إن التجارب الحياتية والصور التى تقابل يوميا قد أضحت موضعا للبحث والتمحيص. لقد ساد شعور منذ أمد – لم يعلن عنه صراحة – بأنه توجد فجوة تتزايد مع الأيام بين العلم والتصور الإنسانى للطبيعة، وليس واضحا للآن إن كان هذا الشعور على أساس صادق أم لا، ولكن الذين يرون أن العلم ينساق إلى مأزق يرون فى علم الهيولية المخرج من هذا الوضع.

وفى ثنايا العلم ذاته، خرجت الهيولية من الأبواب الخلفية للعلم. لقد كان التيار الأساسى لعلم القرن العشرين هو فيزياء الطاقة العالية، حيث يتم استكشاف المزيد من الجسيمات الأولية التى تزداد ضآلة فى الكتلة، على مستويات متزايدة من الطاقة، وفترات من الزمن تزداد تناقصا مع الأيام. ومن هذا التيار ظهرت نظريات عن القوى الأساسية للطبيعة، وعن نشأة الكون، على أن الشعور بعدم الرضا بدأ ينتاب بعض العلماء الشبان. فقد أخذ التيار يبطئ من سريانه، ووجدوا فى علم الهيولية الوليد الأمل فى تعديل المسار للفيزياء فى مجموعها.

فمع ثورة الهيولية وجد العلماء أنفسهم يعودون دونما حرج إلى قضايا على مستوى الحياة اليومية، بجوار دراسة المجرّات تكون دراسة السحب، وتجرى أبحاثهم على أجهزة للحاسوب الشخصى بدلا من الأجهزة فائقة القدرة، وتضم المجلات العلمية المتخصصة بجوار مقال عن النظرية الكمية مقالاً عن الكرة النطاطة. إن النظم البسيطة قد أظهرت مشاكل عويصة فى قضية التنبؤ، ولكن نظاما قد أطل برأسه من بين عشوائية تلك النظم، عشوائية محكومة بالنظام! إن علما جديدا بدأ يصل الفجوة السحيقة بين ما تفعله الطبيعة على مستوى الوحدات؛ جزيء من الماء أو خلية فى نسيج القلب، وبين ما تفعله الملايين من هذه الجزيئات أو الخلايا فى مجموعها.

انظر إلى بقعتين من الزبد في قاع بئر تنحدر المياه فيه، وحاول أن تتساءل عن البعد بينهما حين كانا عند السطح. ليس من سبيل للإجابة، من وجهة نظر العلم التقليدي. فكأن الله سبحانه هو الذى تولى خلط هذه الجزيئات بقدرته الخفية. لقد جرت العادة حين رؤية ظاهرة معقدة، أن يُعتقد أن وراءها أسبابا معقدة. وحين يتلاحظ وجود صلة عشوائية بين المدخلات والمخرجات لنظام ما، يُظن على التو أن الأمر متروك لصدفة لا نظام لها، أو على أن السبب هو تداخل من شوشرة خارجية قوية فى النظام الأولي. وقد نبعت الدراسة الحديثة للهيولية من تزايد إحساس منذ بداية الستينات بأنه من الممكن بمعادلات بسيطة نمذجة نظم يُظن فيها الفوضوية، كتدفق عنيف لمياه شلال. فالاختلافات الضئيلة فى المدخلات يتولد عنها اختلافات ضخمة فى المخرجات، وهى ظاهرة يطلق عليها "**الحساسية للظروف الأولية** sensitivity to initial conditions" وفى مجال الطبيعة الجوية، يُطلق على هذه الظاهرة تندرا "**ظاهرة الفراشة** butterfly effect"، ومفادها أن رفرفة فراشة بجناحيها فى بكين يمكن أن يتولد عنها بعد عدة أسابيع عاصفة جوية فى نيويورك.

وحين يعود علماء الهيولية بذاكرتهم إلى منشأ هذا العلم، يجدون الكثير من رواسب الماضي، على أن شيئا واحدا يبدو مؤكدا، لقد كانت ظاهرة الفراشة هى نقطة البداية.

---

i كان ذلك لإنتاج القنبلة الذرية–المترجم

ii جمع "كم quanta" وهو الاصطلاح الذى يطلق على أقل مقدار غير قابل للتجزئة من الوحدات الأساسية، كالطاقة والزمن والكتلة، طبقا لمفهوم النظرية الكمية–المراجع

iii بعض هذه المصطلحات سوف تعرض تفصيلا فى ثنايا الكتاب، وبعضها خارج عن نطاقه–المترجم

iv يقصد بذلك أن للأشياء قيما محددة، وهو ما رفضته نظرية الكم متمثلا ذلك في مبدأ عدم اليقين، ففى عالم ما دون الذرة ليس لك أن تأمل فى الحصول على قيم حاسمة كموضع إلكترون بالذات فى وقت محدد، بل الأمور كلها احتمالية، وننوه إلى أن كلمة determinism هنا تأخذ معنى يختلف عن "الحتمية" والتى تعنى التسليم بالقضاء والقدر، فالمجالان مختلفان كلية. –المترجم



ظاهرة الفراشة

سطعت الشمس فى سماء لم تعرف السحب، وهبت الريح على أرض ملساء كالزجاج. لم يكن المساء يأتى على الإطلاق، ولا يتحول الخريف إلى شتاء، والمطر لم يحدث أن انهمر. كان تحول الطقس فى برنامج **محاكاة** simulation الطقس على شاشة حاسوب "**إدوارد لورنز** Edward Lorenz" يتغير ببطء ولكن بثقة، عبر طقس جاف فى قيلولة يوم من أيام منتصف العام، كما لو كان العالم قد تحول إلى هذه المدينة الخيالية، أقرب إلى صورة مبسطة لجو جنوب كاليفورنيا.

كان لورنز يراقب الطقس الحقيقى خلال نافذة حجرته؛ الضباب فى مطلع النهار يزحف على مبانى **معهد ماساشوستس للتكنولوجيا** Massachussets Institute of Technology (M. I. T)، أو السحب المنخفضة تنساب آتية من الأطلنطى. ولم يكن شيء كالضباب أو السحب ممثلا على حاسوبه من طراز Royal McBee، هذه الآلة العتيقة المكونة من تكدس هائل من التوصيلات والصمامات الإلكترونية المفرغة، والتى تشغل قدرا لا بأس به من غرفة مكتبه، تصدر ضوضاء وحرارة مثيرين للأعصاب، ولا يمر أسبوع أو اثنان إلا وهى معطلة لسبب أو لآخر. لم يكن لها لا من الذاكرة ولا من السرعة ما يتيح تمثيل الطقس الحقيقي. ومع ذلك فقد نجح لورنز فى عام ١٩٦٠ فى تصميم لعبة طقس أدهشت أقرانه آنذاك. وبين الحين والآخر كانت الآلة تسجل مرور يوم عن طريق إخراج صفوف عديدة من الأرقام، إذا كان بإمكانك أن تفسرها، شعرت بالرياح وهى تهب آتية من الشرق متجهة إلى الشمال، ثم إلى الجنوب، ثم إلى الشمال مرة أخرى، والدوامات الهوائية المرمَّزة بالنظام الرقمى الثنائى تزحف بطيئة على الكرة الأرضية النموذجية. وبكلمة تنتشر فى القسم، يأتى العاملون فى مجال الطبيعة الجوية مع تلاميذهم يتراهنون عما سيكون عليه طقس لورنز فى الإخراج التالى للحاسوب. بصورة ما، لم يكن نفس الشيء يتكرر مرتين أبدا.

كان لورنز يعشق الطقس، وهو مطلب جوهرى لمن أراد أن يعمل فى مجال الطبيعة الجوية. لقد استمتع بما فيه من تحدٍ، وأبدى إعجابا بأنماطه التى تأتى وتروح مع

تقلبه، مجموعات من الدوامات والأعاصير، تخضع دائما للمعادلات الرياضية، ولكن أبداً لا تكرر نفسها. كان حين ينظر للسحب يخيل إليه أنها تتضمن هيكلا ما. لقد ظن ذات يوم أن دراسة الطقس أشبه بدراسة صندوق مسحور، والآن يتساءل إذا كان بمقدور العلم أن يسبر غور هذا الصندوق. لقد كان للطقس لديه مذاق لا يكفى التعبير عنه بمجرد المتوسطات، درجة الحرارة المتوسطة فى بلدة كذا، أو متوسط هطول الأمطار فى مدينة كذا، فكل هذه إحصاءات، أما المضمون فكامن فى الأنماط التى يتشكل بها الهواء الجوى مع الأوقات، والتى سَجّلها على حاسوبه.

كان هو السيد المطاع على الكون الممثل على جهازه، يضع له ما يشاء من قوانين. بعد فترة من التجربة والخطأ، اختار اثنى عشر من القوانين الرقمية التى تربط بين درجة الحرارة والضغط، وبين الضغط وسرعة الرياح. كان يدرك أنه يُطبِّق قوانين نيوتن للحركة، وهى قوانين تتصور الكون كساعة منضبطة، ما أن يبدأ عمله حتى يستمر على نفس النمط إلى الأبد دونما حاجة لتدخل خارجي. كانت هذه هى الفلسفة التى بنى عليها نموذج الطقس على الحاسوب.

كان لورنز طرازاً غريباً بين المشتغلين بالطبيعة الجوية، يحمل وجه مزارع من الغرب الأمريكي، ذى عينين تجعلانه يبدو ضاحكا حتى لو لم يكن كذلك، ضنينا فى الحديث عن نفسه أو عن عمله، مفضلاً أن يكون هو المستمع. كثيرا ما كان يغرق نفسه فى حسابات أو أحلام يجدها أقرانه مستحيلة، وكان أقرب أصدقائه يشعرون بأنه يقضى أغلب وقته سابحا فى فضاء بعيد.

كان فى صباه مُغرَماً بتتبع درجات الحرارة، ولكنه كان أيضا مغرما بكتب المعضلات الرياضية. وكثيرا ما كان يشاركه والده فى حلها. وحين كان يبدو أن معضلة ما مستعصية على الحل، كان والده يطمئنه أن هذا أمر وارد، فمن الممكن أن تتم البرهنة على أن مسألة ما لا حل لها. وحين تخرج عام ١٩٣٨ وجد فى نفسه ميلاً شديدا للرياضيات، إلا أن الرياح أتت بغير ذلك، فخلال الحرب العالمية الثانية أُسند إليه عمل التنبؤ بالطقس لخدمة القوات الجوية. وبعد الحرب قرّر أن يظل فى نفسَ المجال، دارساً نظرياته، مدعما إياه بشيء من الرياضيات. وقد اكتسب شهرة بنشر بعض المقالات عن موضوعات تقليدية، مثل حركة دوران الهواء الجوي، ولكنه فى نفس الوقت ظل يفكر فى مسألة التنبؤ الجوى.

وقد كان موضوع التنبؤ بالنسبة للجاديّنَ من العاملين فى الطبيعة الجوية أقل من أن يُعتبرَ علما. إنه عمل يقوم به الفنيون، يعتمد أساسا على التخمين، أما المراكز

البحثية فتفضل الموضوعات التى تفضى إلى حل ملموس. كان لورنز عالماً بغموض عملية التنبؤ، وقد مارسه هو نفسه خلال الحرب، ولكنه كان يُكِنُّ له اهتماما من نوع خاص، اهتماما ذا نزعة رياضية.

ولم يقف الأمر لدى أغلب علماء الستينات عند احتقار التنبؤ بالطقس، بل تعداه إلى عدم الثقة فى أجهزة الحاسوب. فهذه الحاسبات المعقدة لم تكن تشبه الأجهزة المتطورة المستخدمة فى التجارب العلمية فى شيء. وعلى ذلك فقد كانت مسألة النمذجة الرقمية للطقس شيئا مقيتا، ولكنه أمر قد آن أوانه فى حقيقة الأمر، فقد قُدِّرَ للتنبؤ بالطقس أن ينتظر قرنين من الزمان إلى أن تظهر تلك الآلات التى تستطيع تكرار العمليات الحسابية لآلاف المرات دون كلل فى لمح البصر، وبقدرة لم يتصورها عقل من قبل. فالحاسوب وحده هو القادر على أن يحقق وعد نيوتن بأن الكون يسير على قواعد محددة، فما حققه علماء الفلك بالحساب البسيط يمكن لعلماء الطبيعة الجوية تحقيقه بواسطة الحاسوب، أن يعرفوا المستقبل بناء على معرفة الظروف الأولية والقواعد العلمية. فالقوانين التى تحكم حركة الهواء والماء معروفة تماما، كما هو الحال بالنسبة للقوانين التى تحكم حركة الكواكب. وعلماء الفلك لم يصلوا للكمال المطلق فى هذا الكون السحيق المعقد، ولن يفعلوا، على أن حساباتهم كانت من الدقة العملية لدرجة أن الناس قبلوها كحقائق راسخة. فحين يقول الفلكى إن مُذَنّباً معينا سوف يعود للظهور بعد كذا من السنوات، يؤخذ ذلك على أنه حقيقة علمية وليس تنبؤا. إن تنبؤات علم الفلك تحدد المسارات الدقيقة لأجرام السماء، فلماذا لا يفعل علم الطبيعة الجوية نفس الشيء للرياح والسحب؟

إن الطقس أمر معقد، ولكنه من حيث المبدأ يخضع لنفس القوانين. لعل حاسوبا ذا قدرة كافية يحقق تخيل لابلاس[i] -وهو الذى اعتنق فلسفة نيوتن التحديدية كما لم يفعل أحد غيره - للعقل الفائق، والذى يتصوره قادراً على استيعاب كافة القوانين، بما يُمكِّنه من القيام بعمليات التنبؤ لكافة الظواهر الفيزيقية بدقة مطلقة. بالطبع تزرى النظرية الكمية فى أيامنا -بما تضمنته من **مبدأ عدم اليقين** uncertainty principle[ii] بهذا الحلم، ولكن يبدو أن الحاسوب قد جدده فى أذهان كثير من العلماء بالنسبة لمجالات تخصصاتهم، كعلماء البيولوجيا والاقتصاد والأطباء العقليين. إنهم يحاولون تحليل الكون الذى يتعاملون معه إلى آخر ذرة فيه، ليخضعوها لقواعدهم العلمية. فى كل هذه العلوم، سيطرت روح نيوتن التحديدية على أذهان علمائها، وقد اختلطت فكرة التنبؤ مع فكرة الحوسبة منذ أن فكر **جون فون نيومان**[iii] John von Neumann فى

وضع التصميم المبدئى للحاسوب بشكله الحديث فى معهد الدراسات المتقدمة Institute of Advanced Study ببرتسنون Princeton بنيوجرسى فى مطلع الخمسينات. كان فون نيومان يدرك أن نمذجة الطقس مجال مثالى للتطبيق للحاسوب.

كانت هناك على الدوام ثغرة طفيفة فى عمل العلماء، تقبع منزوية كديْن لم يسدد. إن القياسات المعملية لا يمكن أبدا أن تكون دقيقة بصورة تامة. كان العلماء المنضوون تحت لواء نيوتن يرفعون على الدوام راية أخرى مفادها شيء من هذا القبيل: "إذا ما أُعطينا الظروف المبدئية التقريبية لنظام ما، والقوانين التى تحكمه، يمكننا أن نتوصل دائما إلى نتائج تقريبية". وقد عبّر أحد العلماء عن هذا المبدأ بالمثال التالي: "إذا كنت تحسب حركة كرة بلياردو، ليس لك أن تأخذ فى الاعتبار سقوط صخرة على كوكب فى أحد المجرّات البعيدة، فالمؤثرات الطفيفة يمكن على الدوام إهمالها. إن **التقارب**[iv] convergence هو سمة اتجاه التصرفات، وليس لمؤثر طفيف أن يُدمِّر هذا التقارب". فمن وجهة النظر التقليدية، فإن مفهومى **التقريب** approximation والتقارب أمران مُبَرراَن تماما. ونجحت هذه الفكرة تقريبا، فإن خطأ طفيفا فى قياسات مسار المذنّب هالى عام ١٩١٠ قد أدت إلى خطأ طفيف فى حساب موعد ظهوره عام ١٩٨٦، وسيظل هذا الخطأ عالقاً لملايين السنين الآتية. ويعتمد الحاسوب على نفس الفكرة فى توجيه مسار مركبات الفضاء، والاقتصاديون فى تنبؤاتهم بحركة البورصة (بدرجة أقل من النجاح)، وهو ما فعله الرواد الأوائل فى مجال التنبؤ بالطقس.

فعن طريق حاسوبه البدائي، بسّط لورنز الطقس إلى هيكله الأولي، ومع ذلك فقد كانت الرياح فى مخرجات حاسوبه تتصرف تماما كما تفعل الرياح الطبيعية على الأرض. لقد وافقت فكرته المحببة عن الطقس، إنه يكرر نفسه فى أنماط مألوفة على مر الأوقات، الضغط يرتفع وينخفض، والرياح تتحول من الجنوب للشمال. ولكن التكرار لا يكون متطابقا بالضبط، لقد كان تكراراً للأنماط، ولكن مع وجود الاختلافات بها، عدم انتظام منضبط.

ولتوضيح الرؤية أكثر، ابتدع لورنز نظاما رسوميا بدائياً، فبدلا من إخراج الأسطر من الأرقام، جعل الحاسوب يُخرج أشكالاً بيانية من الحرف "a"، تترنح بين قمم ووديان مع دوران ورقة التسجيل، تمثل حركة الرياح عبر عالمه الوهمي. كانت هناك دورات تتكرر، ولكن دون أن تتطابق دورتان أبدا. بدا النظام وكأنه يُخرج أسراره شيئا فشيئا أمام نظر المتنبئ.

وذات يوم من أيام شتاء عام ١٩٦١، أراد لورنز اختبار دورة بتفصيل أكثر، وبدلا من أن يبدأها من البداية، اختصر الطريق بأن وضع الظروف الأولية التى استخدمها كمدخلات للإخراج السابق مباشرة. ثم غادر الحجرة ليريح نفسه من ضوضاء الآلة وحرارتها، ويمتع نفسه بفنجان من القهوة ريثما يتم الحاسوب عمله. وحين عاد بعد قرابة الساعة، رأى شيئا غير متوقع.

شيئا يحمل فى طياته بذرة لميلاد علم جديد!

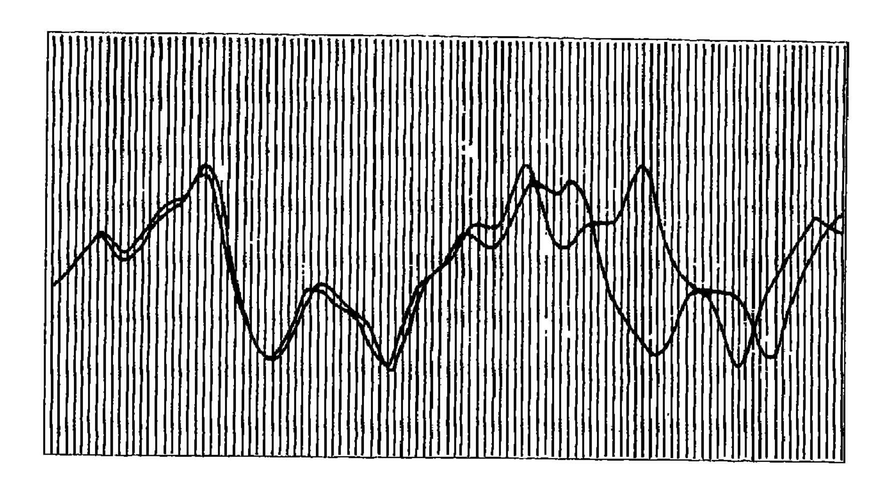
■ ■ ■

كان المفروض أن تكون المخرجات فى الدورة الجديدة متطابقة مع الدورة السابقة. لقد أدخل لورنز البيانات بنفسه. والبرنامج لم يتغير. ولكن تصرف الطقس أمام عينيه كان مختلفا بالمرة، ففى غضون فترة بسيطة انمحى التشابه بين الدورتين تماما. لقد كانت أول خاطرة فى ذهنه أن عطلا آخر قد ألم بالجهاز.

وفجأة أدرك الحقيقة، ليس بالجهاز أى عيب، فالمشكلة كانت فى الأرقام التى أدخلها. إن الأرقام كانت تخزن فى ذاكرة الحاسوب لستة أرقام عشرية، ولكنه قربها لثلاثة أرقام فقط، توفيرا للمساحة. إن تقريبا يتناول الرقم ابتداء من الرابع العشري، أى جزء من الألف، يوحى بأن الأثر لن يكون ذا بال بالمرة.

كان افتراضا معقولا، فلو أن قمرا صناعيا استطاع قياس درجة حرارة المحيط لجزء من الألف من الدرجة، لكان هذا حسن حظ فريد فى نوعه. ومن المنطقى أن يتسبب الحيود الطفيف فى المدخلات فى حيود طفيف فى التشابه بين الدورتين. إن الفرق لا يزيد تمثيله عن نفخة من الهواء، من المفروض أن تذوى على التو دون أن تترك أى أثر على النمط العام للطقس. على أن البادى من مخرجات الحاسوب أن فرقا كهذا قد تسبب فى أثر غاية فى الخطر.

وأخرج لورنز مخرجات الدورتين على ورق شَفَّاف، ووضع الشكلين فوق بعضهما ليرى كيف يجرى التغير بينهما. فى البداية تطابقت أول قمتين، ثم تلا ذلك فرق بحجم شعرة، وعند حدوث القمة التالية، كان الفرق بين القمتين واضحا، وعند القمة الثالثة فالرابعة، تلاشى التشابه تماما. فى هذا اليوم، أدرك لورنز أن التنبؤ طويل الأجل للطقس لن يكون مكللا بالنجاح على الإطلاق.



شكل ١ - ١ كيف يتباعد نمطان للطقس: من نفس النقطة تقريبا، رأى إدوارد لورنز الطقس الذى بناه على حاسوبه يخرج أنماطا تتباعد عن بعضها البعض بالتدريج حتى يُفقَد أى تماثل بينها.

وقد عبّر عن ذلك قائلا: "لقد كنا دائما غير قادرين على التنبؤ بالطقس بصفة قاطعة، واليوم بدا عذرنا. فالشخص العادى الذى يرانا نتنبأ بقدر معقول من الدقة بالمدّ فى البحار إلى عدة أشهر تالية يتساءل لماذا لا نفعل نفس الشيء مع الطقس إن الأمر لا يعدو اختلافا فى الوسط، أما القوانين فمتشابهة. لقد أدركت أن النظم التى لا تتسم بالدورية يستحيل أن تكون مجالا للتنبؤ طويل الأمد."

■ ■ ■

لقد اجتاحت فترة الخمسينات والستينات موجة غير صحيحة من التفاؤل بالنسبة للتنبؤ الجوي. وقد امتلأت الصحف والمجلات بمقالات لا تبشر فقط بدقة فى التنبؤ به، بل بالتحكم والتعديل فيه. إن تقنيتين كانتا تنضجان معا، الحاسبات الرقمية، والأقمار الصناعية. وكان الإعداد قائما لبرنامج يستغل إمكاناتهما معا؛ "برنامج دراسات الطقس للكرة الأرضية". كان الشعور سائدا بأن الجنس البشرى قد أصبح على وشك أن يكون سيد الطقس لا ضحيته. سوف تغطى القباب المزارع، وستقوم الطائرات بتلقيح السحب، وسوف يتعلم العلماء كيف يسقطون المطر وكيف يوقفونه.

كان الأب الروحى لهذه الموجة هو نفسه **فون نيومان**، والذى صمم حاسوبه بهذه النيّة بالذات: التحكم فى الطقس، من بين أهداف أخرى بطبيعة الحال، فأحاط نفسه بالعلماء فى الطبيعة الجوية، وألقى كلمات فى محافل علمية عن خططه فى هذا المجال. كان لديه مبرر رياضى لهذا الإغراق فى التفاؤل، لقد كان يدرك أن أى نظام ديناميكى لابد وأنّ له نقطة اختلال فى التوازن، حيث تتسبب تأثيرات طفيفة فى نتائج ضخمة، كوضع كرة متوازنة على قمة حادة، إلا أنه كان يأمل فى مواجهة مثل هذه الأوضاع بقوة حاسوبه، ولكن التوفيق خانه فى إدراك ظاهرة الهيولية، حيث تسود حالة عدم التوازن جميع نقاط النظام.

وبحلول الثمانينات كانت المجهودات لتنفيذ أمل فون نيومان فيما يختص بالجانب التنبّئى للطقس تجرى على قدم وساق، فقد أُنشئت الإدارات الضخمة ذات الميزانيات الوافرة، وتمثّلت الريادة فى ذلك فى الولايات المتحدة فى مبنى بماريلاند، مجهز بشبكة رادارية وراديوية على سطحه، وحاسوب عملاق لا يشبه حاسوب لورنز إلا فى نظرية العمل. فبينما كان الأخير يجرى ستين عملية ضرب فى الثانية، كان الأول، من طراز C.D.C.205 ينفذ عدة ملايين عملية فى الثانية، وبينما كان لورنز سعيدا بحل اثنتى عشرة معادلة معا، كان الحاسوب الجديد يستطيع التعامل مع نموذج مكوّن من عدة آلاف منها. كان النموذج يفهم طريقة تحريك الرطوبة للحرارة فى الهواء حين تكثّفها وحين تَبخُّرها، وكانت الرياح الرقمية تشكلها جبال رقمية، وكانت البيانات تصبّ فى النظام من كافة أرجاء المعمورة، من طائرات وأقمار صناعية وسفن، **كان المركز القومى للأرصاد الجوية** The National Meteorological Center ثانى أقوى مركز للتنبؤ فى العالم.

أما الأول فى هذا المضمار فقد كان فى ريدنج بإنجلترا، على مسافة ساعة بالسيارة من لندن، وهو **المركز الأوربى للتنبؤ متوسط المدى للطقس** The European Center for Medium Range Weather Forecasts، يشغل مبنى متواضعا على طراز مبنى الأمم المتحدة، مزينا بالهدايا من كافة الأقطار، بنى بنشوة روح السوق الأوربية المشتركة آنذاك. فى هذا المبنى قررت الدول الأوربية المساهمة أن تحشد أفضل خبرتها العلمية فى عملية التنبؤ بالطقس. وقد عزا الأوربيون نجاحهم إلى فريق العمل غير الحكومى الذى تولى تنفيذ المشروع، وإلى حاسوبهم فائق القدرة من طراز Cray والذى كان دائما يسبق قرينه الأمريكى بخطوة.

وقد كان التنبؤ بالطقس بداية لعملية نمذجة النظم المعقدة حاسوبيا، ولكنه لم يكن النهاية. فقد خدمت هذه التقنية العديد من النظم العلمية التى كانت تنشد التنبؤ بكل

شيء، بدءا من تصرُّف كمية قليلة من سائل إلى تصميم الرَّفاصات إلى التنبؤ بالتقلبات الاقتصادية. فبالفعل تشابه التحليل الاقتصادى فى السبعينات والثمانينات مع النظم العلمية الأخرى فى استخدامه للحاسوب. فالنماذج الموضوعة تقوم على تعامل الحاسوب مع كمية ضخمة من المعادلات التى تحكم الظاهرة المنمذجة، على أساس من كم من البيانات والقياسات لدرجات حرارة أو لتدفق نقدي، للوصول إلى توقع مستقبلى. وقد كان المبرمجون يأملون ألا تَفسد النتائجُ نتيجة بعض التبسيطات الحتمية التى تقتضيها عملية النمذجة خلال البرمجة. فإذا ما أخرج الحاسوب نتائج واضحة الشذوذ، كأن أغرق صحراء فى فيضان أو أعطى معدل الفائدة تضاعفا ثلاثى القوة، فإنهم يعودون لمراجعة معادلاتهم لجعل نتائج التنبؤ أقرب للمنطق.

كانت النماذج الحاسوبية للنظم الاقتصادية تبدو بالنسبة للتنبؤ غير موفقة بالقدر المرضي، ولكن مع ذلك فقد كانت الحكومات والمؤسسات تأخذ بها، ربما بسبب الاضطرار أو الافتقاد لشيء أفضل. ولعلهم كانوا يدركون أن تمثيل عامل كأذواق المستهلكين ليس بالأمر الهين مثل تمثيل نسبة الرطوبة الجوية، وأنه لم توضع بعد معادلات دقيقة للتقلبات السياسية أو التغير فى الأذواق. ولكن القليل هم من تنبهوا لضعف فلسفة النمذجة الحاسوبية ذاتها، حتى مع وفرة البيانات ودقة المعادلات، كما فى حالة التنبؤ بالطقس.

لقد أدت النمذجة بالفعل إلى تحويل عملية التنبؤ بالطقس من مقدرة شخصية إلى علم، وقد قدر المركز الأوربى للتنبؤ أنه قد حدثت وفورات تقدر ببلايين الدولارات سنويا بسبب التحسن فى عملية التنبؤ. ولكن التنبؤ لأكثر من يومين أو ثلاثة كان أمرا مشكوكا فى صحته، ولأكثر من ذلك لا يعتد به على الإطلاق.

كان السبب هو **ظاهرة الفراشة** butterfly effect. فعند تأثير طفيف، وهو ما يعنى لدى رجال الأرصاد صاعقة رعدية مثلا، فإن التنبؤ ينهار سريعا، حيث تتضاعف الأخطاء والشكوك، متصاعدة بصورة شديدة الاضطراب.

إن شبكة الرصد الحالية تعمل عن طريق مجسات متناثرة على أبعاد ستين ميلا بين المجس والآخر، ومع ذلك فإن بعضا من التخمين لا بد منه، حيث لا يمكن للمحطّات الأرضية أو الأقمار الصناعية أن ترى كل شيء. ولكن هب أن المجسّات قد غطّت الكرة الأرضية على بعد قدم واحد من بعضها، مرتفعة على مسافات قدم واحد إلى أعلى الفضاء الجوى، وأن كل مجس يعطى كافة البيانات بدقة كاملة من حرارة إلى رطوبة إلى ضغط جوى، إلى أى عامل يتطلبه الرصد، وأن البيانات تدخل إلى حاسوب فائق

القدرة دقيقة بعد أخرى. إنه رغم ذلك لن يمكنه أن يحدد ما سيكون عليه الحال بعد شهر من الزمان فى مكان ما. ففيما بين الدقيقة الأخرى، تحدث تغيرات لن يشعر بها الحاسوب، تحيد بصورة طفيفة عن المتوسط. وفى الدقيقة التالية سيكون التغير على بعد القدم التالى شيئا ملموسا، ثم سرعان ما يتضاعف الخطأ عند عشرة أقدام، وهكذا إلى مدى الكرة الأرضية.

لقد أخبر لورنز أحد أصدقائه عن ظاهرة الفراشة، وما أحس به بالنسبة للتنبؤ طويل المدى، فأجابه الصديق أنه بالنسبة للتنبؤ فلا، أما بالنسبة للتحكم فنعم. لقد كانت إجابة **فون نيومان** من قبل. لقد كان يظن أن تعديلا طفيفا يمكن أن يؤدى إلى تغيرات محسوسة.

ولكن لورنز رأى الأمر مختلفا. نعم، يمكننا أن نغير فى الطقس، ولكن ما أن نفعل ذلك، حتى نفقد القدرة على تحديد ما كان سيصير إليه الحال لو لم نتدخل. إن الأمر أشبه بعملية خلط إضافية لأوراق لعب مخلوطة بالفعل، تعلم أنها سوف تؤثر على حظك، ولكنك لا تعلم هل للأحسن أم للأسوأ.

■ ■ ■

كان اكتشاف لورنز مفاجأة أشبه بما حدث من قبل لأرشميدس، ولكنه لم يكن بالرجل الذى يجرى مهللا "وجدتها"، وبدلا من ذلك اتجه إلى فهم مضمون ما اكتشفه، وما يعنيه فهم **التدفقات flow** مهما كان مجالها العلمى.

لو أن لورنز اكتفى بظاهرة الفراشة، لكان كل ما عمله هو مجرد نقل أخبار سيئة، ولكنه قد رأى شيئا أكثر من العشوائية كامنا فى أعماق نموذجه للطقس. لقد رأى هيكلاً هندسياً دقيقاً، انضباطاً متنكراً فى صورة عشوائية. لقد كان هو فى الأصل عالما رياضيا فى ملابس رجل طبيعة جوية، وقد آن الأوان ايلعب الدورين معا. فليكتب أبحاثاً فى علم الطبيعة الجوية، ولكن ليكتب أيضا أبحاثاً رياضية تحت غلالة من ذلك العلم. وبعد حين، اختفت هذه الغلالة تماما.

لقد أخذ اتجاهُه يتحول أكثر فأكثر إلى رياضيات النظم التى لا تعرف حالة الاستقرار، تلك التى تكرر نفسها تقريبا، ولكن لا تفلح أبدا فى أن يكون التكرار متطابقا. كل الناس يعلمون أن الطقس من قبيل ذلك، نظام لادورى aperiodic. والطبيعة مليئة بمثله، الكائنات التى يرتفع تعدادها وينخفض بصورة شبه دورية،

الأوبئة التى تظهر وتختفى فى مواعيد مراوغة شبه منتظمة. لو قدّر للطقس أن يكرر نفسه مرة واحدة بصورة تامة، كل هبّة ريح وقطرة مطر، لكرر نفسه بهذا الشكل للأبد، ولزالت مشكلة التنبؤ تماما.

أدرك لورنز أنه لا بد من وجود رابطة بين عدم الدورية وعدم القابلية للتنبؤ. لم يكن من السهل وضع معادلة تضم اللادورية التى ينشدها، فقد كان حاسوبه يميل دائما إلى التقيد بدورية معينة، ولكن لورنز أخذ يجرب بعض التعقيدات الطفيفة، إلى أن نجح أخير فى تضمين معادلته المتغيرة كمية الحرارة التى تسرى من الشرق للغرب، لتماثل الطريقة الحقيقية التى بها تسخن الشمس الجانبين الشرقى والغربى للقارة الأمريكية. لقد اختفت الدورية.

لم تكن ظاهرة الفراشة صدفة عارضة، لقد كانت أمرا ضرورياً. لقد تَدبّر لورنز الأمر؛ لنفرض أن الاضطرابات الطفيفة ظل تأثيرها طفيفا، ولم يتصاعد إلى نتائج جوهرية، عندئذ لو أن الطقس اقترب من حالة كان قد مَرّ بها سابقا، لكرر نفس النمط بطريقة تقريبية، ولخلت الدنيا من هذا الثراء فى التنوع فى أنماط الطقس الذى نراه فى الواقع. فللتمتع بهذا الثراء وما يصاحبه من جمال كوني، لا بد من شيء كظاهرة الفراشة.

وكان لا بد من وضع اسم علمى لظاهرة الفراشة، فكان ذلك: "الحساسية المرهفة للظروف الأولية"، وهو مفهوم ليس بغريب على البشرية، وللنظر إلى الأغنية الشعبية التالية:

For loss of a nail, the shoe was lost;
For loss of a shoe, the horse was lost;
For loss of a horse, the rider was lost;
For loss of a rider, the battle was lost;
For loss of a battle, the kingdom was lost!"

ولنحاول ترجمتها على النحو التالى:

ضاعت الحدوة حين المسمار ضاع.
ولضياع الحدوة، الحصان ضاع.
فضاع الفارس حين الحصان ضاع.
فخسرت المعركة حين الفارس ضاع.
وبخسارة المعركة، الوطن ضاع!

فى العلم كما فى الحياة، من المعلوم أن سلسلة من الحوادث قد تتفاقم إلى نقطة تعظّم من آثار الحوادث التافهة. ولكن الهيولية تعنى أن هذه النقطة هى الشائعة فى كل مكان من النظام، ففى نظام كالطقس، تكون الحساسية للظروف الأولية أمرا لا مناص منه بناء على الأسلوب الذى تتشابك فيه النطاقات الضئيلة مع الكبيرة.

وتملّك رفقاء لورنز العجب حين رأوا كيف مثّل كلاً من اللادورية والحساسية للظروف الأولية فى النسخة المعدلة من طقسه، اثنى عشرة معادلة، يعاد حسابها مرة تلو الأخرى بقدرة لا تعرف الكلل، كيف يمكن لكل هذا الثراء، هذه اللاتنبئية، هذه الهيولية، أن تنبع من نظام تحديدى بسيط؟

■ ■ ■

وضع لورنز الطقس جانبا، وبحث عن نظام أكثر بساطة لإنتاج التصرفات المعقدة، ووجد ضالته فى نظام يعبّر عنه بثلاث معادلات لا غير. كانت معادلات لاخطيّة، بمعنى أنها تعبر عن متغيرات ليست متناسبة تماما. فالمعادلات الخطية يمكن التعبير عنها بخط مستقيم، وهى سهلة الاستيعاب، كلما زاد متغير زاد الآخر بنفس النسبة. وهى بذلك قابلة للحل، مما يجعلها المفضلة فى المراجع، كما أن لها فضيلة تحمد لها، يمكنك جمع الكميات، وضمها لبعضها البعض.

والنظم الخطية غير قابلة للحل بوجه عام، ولا تقبل الجمع للكميات التى تتعامل معها. ففى النظم الميكانيكية، ونظم الموائع، يكون الجانب اللاخطى من النظام هو الجانب الذى يتم إهماله من الدراسة لإمكان فهم النظام. لنأخذ الاحتكاك مثلا، فبدونه يمكن ربط العلاقة بين الطاقة التى تعطى لجسم وما يكتسبه من سرعة بمعادلة بسيطة يسهل استيعابها، ولكن مع الاحتكاك تتعقد الظاهرة، لأن الطاقة حينئذ سوف تعتمد على السرعة. **فاللاخطية** تعنى أن الفعل الذى يدخل اللعبة له دور فى تحديد قواعد اللعب. فلا يمكنك مثلا أن تضع مقدارا ثابتا للاحتكاك حتى تأخذه فى الاعتبار، لأنه هو نفسه يعتمد على السرعة، فى نفس الوقت الذى تعتمد فيه السرعة عليه. هذه **الاعتمادية المتبادلة** هى ما يجعل النظم غير الخطية مستعصية على الفهم، ولكنها فى نفس الوقت تعطى هذه النظم ثراء لا يتاح للنظم الخطية. ففى ديناميكا الموائع توجد معادلة شاملة تجمع كافة المتغيرات، تسمى **معادلة نافير - شتوكس Navier - Stokes**، وهى آية فى الإيجاز والشمول، ولكنها غير خطية، ولذا فهى مستعصية على التحليل الكامل. إن

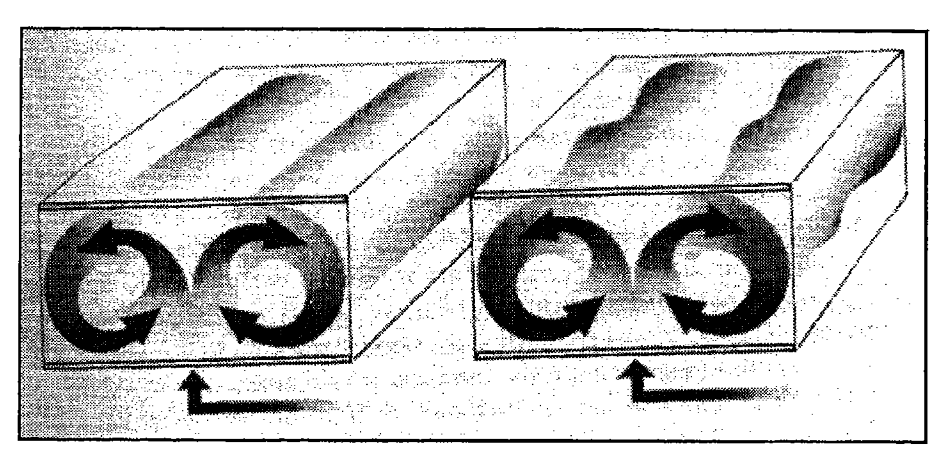
التعامل مع معادلة من هذا القبيل أشبه بالسير في متاهة تتشكل حواجزها بتأثير خطوات السائر بها. كان حريا بالعالم أن يكون غير العالم، وألا يكون العلم بحاجة للهيولية، فقط لو لم تحتو معادلة كهذه على عنصر اللاخطية.

إن ما أوحى للورنز بمعادلاته الثلاث هى العملية المعروفة باسم **"عملية الحمل** convection" وفيها ترتفع السوائل والغازات حينما ترتفع درجة حرارتها. فالهواء الجوى تزداد حرارة الملاصق منه للأرض حين تسخنها أشعة الشمس، فيرتفع إلى ما فوق الهواء البارد الذى يهبط لأسفل، فيما يعرف بتيارات الحمل. وكان لورنز راضيا بشرح الظاهرة كما تجرى فى فنجان القهوة، قائلا عنها إنها من العمليات الهيدروميكانيكية التى يهمنا أن نعلم كيف نقوم بعملية التنبؤ فيها. كيف لنا أن نحسب الوقت الذى يبرد فيه فنجان من القهوة؟ إذا كان الفنجان ساخنا بدرجة طفيفة، فإن حالته تكون مستقرة ولا نواجه حركة بالسائل، أما لو كان ساخنا جدا، فإن تيارات الحمل تقلّب السائل من أسفله إلى أعلاه، وهو ما يبدو واضحا حين نضع قليلاً من مبيض القهوة فيها. إن مآل النظام على المدى الطويل واضح، سوف يستقر السائل وتسكن حركته، بسبب برودته، وبسبب أن الاحتكاك داخل السائل سوف يقاوم تيارات الحمل. ويقول لورنز لمستمعيه من العلماء: "إننا نواجه مشكلة فى تقدير ما ستكون عليه درجة حرارة السائل بعد دقيقة، ولكن ليس بعد ساعة". إن معادلات الحركة التى تحكم حركة السائل أثناء فقده للحرارة يجب أن تعكس مآل السائل، فالحرارة يجب أن تؤول إلى درجة حرارة الغرفة، والسرعة إلى السكون.

وقد تولى لورنز تبسيط معادلات الحمل إلى أقصى مدى ممكن، ولكنه حافظ على اللاخطية. وقد بدت المعادلات لبساطتها سهلة الحل أمام أقرانه من العلماء، ولكنه قال محذرا: "إذا كنتم تعتقدون أنه بإمكانكم الالتفاف حول الجزء اللاخطي، فأنتم واهمون".

إن أبسط نظام للحمل فى المراجع العلمية يُصوَّر على شكل صندوق به سائل، أملس عند القاعدة، يكون سطحه فى درجة حرارة أبرد مما عليه قاعدته. ويحكم الفرق بين درجتى الحرارة تصرّف النظام، فإن كان طفيفا ظل السائل ساكناً، وتنتقل الحرارة من أسفل إلى أعلى **بالتوصيل الحرارى العادى conduction**، كما لو كان السائل قضيبا من المعدن. لن نجد هنا ما يثير السائل للحركة، والأكثر من ذلك، فإن الوضع يكون مستقراً، فلو حدث أن اهتز الصندوق لأمر عارض، فإن الاضطراب نتيجة هذا الاهتزاز سرعان ما يذوى، ويعود السائل إلى حالة السكون.

والآن، ما أن يوقد المسخّن أسفل الصندوق بدرجة أكبر، حتى يبدأ تصرف جديد للسائل. يسخن السائل عند القاعدة، فيتمدد، وتقل كثافته بالتالي، فيخف وزنه، وحين يستطيع التغلب على الاحتكاك، يشق طريقه لأعلى، بينما يهبط السائل البارد لأسفل. وحين يكون تصميم الصندوق متقنا، تتكون اسطوانة من السائل الساخن الصاعد في أحد الجانبين، مع اسطوانة من السائل البارد الهابط على الجانب المقابل، ومن زاوية مناسبة يُرى السائل يتحرك حركة دائرية.



شكل ٢ - ١ مائع يدور: عندما يسخّن سائل أو غاز من أسفل، يحاول المائع أن يعدل من نفسه على صورة أسطوانة دوّارة (يسار)، إذ ترتفع الجزيئات الساخنة منه إلى أعلى، وتهبط الباردة إلى أسفل في الاتجاه المقابل، وهو ما يعرف بتيارات الحمل. وحين تزداد درجة حرارة التسخين من أسفل، تنشأ بعض الاهتزازات التي تتحرك على طول الاسطوانة جيئة وذهابا (يمين). عند درجة حرارة تسخين أعلى، يضطرب المائع بشكل عشوائي.

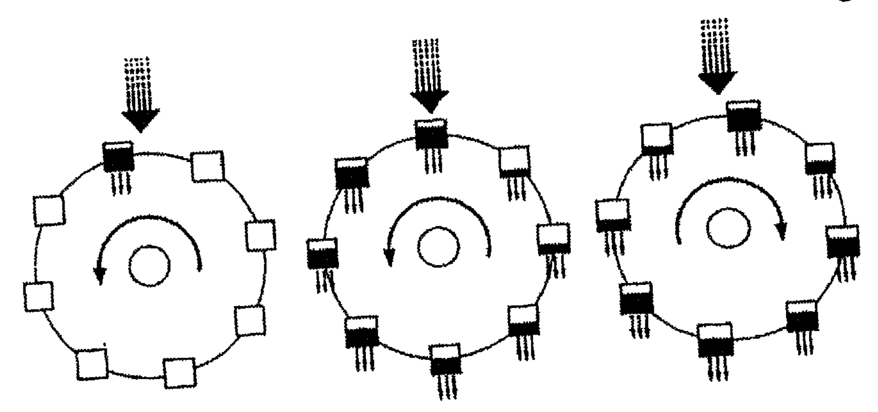
وفي خارج المعمل أيضا، تصنع الطبيعة حركة مشابهة للهواء. فحين تسخن الشمس الأرض مثلا في صحراء، تصنع تيارات الحمل للهواء الساخن ظلالا على السحب وعلى الرمال.

وبزيادة درجة حرارة التسخين، يزداد تعقد النظام، حيث يشتد الاضطراب في السائل. لقد كان نموذج لورنز أبسط من أن يمثل حالة كهذه، فهو يقف عند حد توليد الحركة الدائرية البسيطة التي ذكرناها. ورغم أن نظامه لم يمثّل الحمل بصورة واقعية كاملة، فإنه قد تبين أنه يمثل العديد من النظم بدقة، من ذلك أن معادلاته قد وصفت الدينامو الكهربائي القديم، وهو الجد الأعلى لمولدات الكهرباء الحديثة، حيث يدور قرص

داخل مجال مغناطيسى. وتحت ظروف معينة، وُجِد أن القرص يمكن أن يعكس من اتجاه دورانه، وقد تصور بعض العلماء، بعد أن أصبحت معادلات لورنز معروفة، أن هذه الظاهرة يمكن أن تفسر ظاهرة أخرى، ألا وهى انعكاس المجال المغناطيسى للكرة الأرضية، وهو ما حدث عدة مرات على مدى تاريخها، فى أوقات غير منتظمة أو مفهومة. وفى حالات اضطراب كهذه يلجأ العلماء للبحث عن أسباب خارجية عن النظام، ولكن بدا الأمر كما لو كان النظام المغناطيسى للأرض يحمل معه طبيعته الهيولية.(١)

■ ■ ■

ومن النظم الأخرى التى وصفتها معادلات لورنز بدقة نظاما معينا لعجلة مائية، تعتبر تمثيلا ميكانيكيا لنظام الحمل فى الموائع. فى القمة، يتساقط الماء بصورة ثابتة فى دلاء (جمع دلو) معلقة فى حافة العجلة، كل دلو يُسرِّب الماء بصورة ثابتة من ثقب بأسفله. إذا كان التيار المتساقط بطيئا، فقد لا يصل الماء فى الدلو الأعلى إلى وزن يمكنه من إدارة العجلة. ولكن مع زيادة سرعة التيار تبدأ العجلة فى الدوران، ويكون فى البداية منتظما، على أنه مع زيادة سرعة التيار المتساقط، قد يصل الماء فى الدلاء من الثقل بحيث يدفع العجلة عند سقوطه إلى الناحية الأخرى ليرتفع بقدر ما، قبل أن يهبط مرة أخرى، وشيئا فشيئا تبدأ العجلة فى التأرجح، فتدور مرة فى هذا الاتجاه ومرة فى الاتجاه المضاد.



شكل ٣ - ١ عجلة لورنز الدوارة: يمثل أول نظام هيولى شهير اكتشفه لورنز جهازا ميكانيكياً لعجلة دوارة، قادر على بساطته أن ينتج تصرفات معقدة بدرجة مدهشة.

تشترك الحركة الدورانية للعجلة مع الاسطوانات الدوّارة لتيارات الحمل فى بعض الخصائص. فالعجلة أشبه بشريحة عرضية فى الاسطوانة، وكلا النظامين يدفعان دفعا للحركة عن طريق طاقة من مصدر ما، فى العجلة عن طريق الماء وفى حالة تيارات الحمل عن طريق الحرارة. وكلاهما يشتت الطاقة، السائل يفقد الحرارة، والعجلة تفقد الماء. وفى الحالتين يعتمد تصرف النظام على قوة الطاقة الدافعة.

يصب الماء من أعلى بتدفق ثابت، فإذا كان بطيئا، لن يمتلئ الدلو الأعلى بالدرجة التى تمكّنه من التغلب على الاحتكاك، فلن تدور العجلة أبدا. ويقابل ذلك ألاّ يتمكن السائل من التغلب على اللزوجة، فلا تتكون تيارات الحمل. وعندما يزيد تدفق الماء، يبدأ الدلو الأعلى فى الحركة (يسار)، فتدور العجلة بسرعة ثابتة (وسط).

وعند زيادة التدفق بسرعة أعلى (يمين)، تتحول الحركة الدورانية إلى حالة الهيولية، حيث تتأرجح العجلة ذات اليمين وذات الشمال. ويكون ذلك حين تتدخل اللاخطية فى النظام، فسرعة الامتلاء للدِّلاء تعتمد على سرعة الدوران (يقابل عدم تمكن السائل من امتصاص الحرارة بسبب زيادة سرعة تيارات الحمل)، وسرعة الدوران بدورها تعتمد على سرعة الامتلاء. ففى حالة السرعة العالية للدوران، يمكن لدلو فى الجهة المقابلة أن تندفع للجهة الأخرى قبل أن تتمكن من تفريغ ما بها، فتبطئ من سرعة الصعود إلى أن تتسبب فى انعكاس الحركة.

وقد اكتشف لورنز فى الواقع أن الحركة على المدى الطويل يمكن أن تنعكس عدة مرات، بحيث لا تستقر على حالة ثابتة، ولا تكرر نفسها أبدا فى نمط قابل للتوقع.

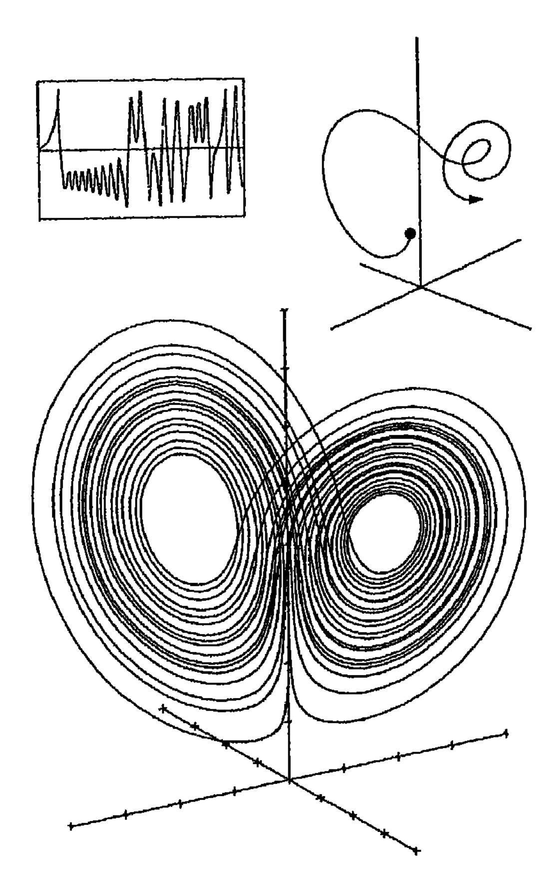
ويدلُنا الحدس الفيزيائى إلى أن النظام مآله إلى الاستقرار، إما أن تدور العجلة منتظمة فى اتجاه واحد، أو تستقر فى التردد بين الاتجاهين بصورة منتظمة أيضا، ويعتمد ذلك على شدة التيار المتساقط. ولكن ما وجده لورنز كان شيئا آخر.

ثلاثة معادلات بثلاث متغيرات تصف حركة النظام تماما، وأخرج حاسوب لورنز أرقاما تعبر عن تلك المتغيرات: ٠ – ١٠ – ٠، ٤ – ١٢ – ٠، ٩ – ٢٠ – ٠، ١٦ – ٣٦ – ٢، ٣٠ – ٦٦ – ٧، ٥٤ – ١١٥ – ٢٤، ٩٣ – ١٩٢ – ,٧٤ تتغير الأرقام الثلاثة صعوداً وهبوطاً مع سريان وحدات الزمن التخيلية، خمس وحدات، مائة وحدة، ألف وحدة، وهلم جرا.

ولجعل الصورة أكثر وضوحا، استخدم لورنز أُسلوب توقيع نقاط الفضاء المجسَّم (ثلاثى الأبعاد) لتوقيع تلك النقاط على منحنى فراغي. ورُسمت نقاط المنحنى الموقّعة شكلاً متصلاً، تعبر عن سلوك النظام. وفى مثل هذه الحالة يمكن أن ينتهى المنحنى عند نقطة ثابتة، معبراً

عن أن النظام قد وصل لمرحلة الاستقرار عند وضع معين، أو أن يأخذ المنحنى شكل قوس مقفل، يكرر نفسه عليه، معبرا عن أن النظام قد استقر على حركة متذبذبة.

ولكن شكل لورنز لم يكن محقِّقا أياً من الاحتمالين. كان يتكرر فى حدود لا يخرج عنها، ولكن ليس على شكل قوس مقفل، بل فى مسار منحنى لا يكرر نفسه أبداً، فهو لا يتقاطع مع نفسه بالمرة، بمعنى تكرر نفس الحالة مرتين. إن المنحنى عبارة عن لولب فراغى مزدوج، أشبه بجناحى فراشة. لقد كان الشكل يعبر عن عدم انتظام، حيث إن الشكل لا يتقاطع مع نفسه، ولكنه نوع خاص من عدم الانتظام.



شكل ٤ - ١ جاذب لورنز: هذا الشكل الساحر، الذى يشبه عينى حدأة أو جناحى فراشة، أصبح رمزاً للاكتشافات الأولية للهيولية. إنه يكشف عن الهيكل المتقَن المختفى

وراء تدفُّق من بيانات تبدو عشوائية. وقد كان النظام التقليدى هو توقيع بيانات متغير معين مقابل الزمن (أعلى يسار)، ولكن توقيع بيانات ثلاثة متغيرات مقابل بعضها البعض يتطلب أسلوباً مختلفاً، فعند لحظة معينة تمثل قيم المتغيرات الثلاثة عن طريق نقطة فى فراغ ثلاثى الأبعاد. وكلما تغير النظام مع الزمن، رسمت هذه النقطة مساراً متصلاً مع تغير قيم المتغيرات (أعلى يمين).

ولأن النظام لا يكرر نفسه أبداً، فإن المسار لا يمكن أن يتقاطع مع نفسه، بل يظل متلولباً إلى الأبد [ملحوظة من المترجم: التقاطع البادى فى الشكل نوع من الخداع، لأن الشكل ثلاثى الأبعاد.] ويعكس التحرّك على هذا المسار التغير المتواصل فى حالة النظام، فمثلا يمثل الانتقال من أحد الجناحين إلى الجناح الآخر انعكاس اتجاه دوران العجلة المائية أو تيارات الحمل.

وبعد عدة سنوات، حين كان العلماء يسترجعون معادلات لورنز الرائدة، كان لسان حالهم يقول: "ذلك البحث الرائع". إلا أن ذلك البحث بدا وقت ظهوره أشبه بوثيقة من التاريخ القديم، تحمل من الأسرار أكثر ما تكشف عنها. وعلى مدى آلاف من الأبحاث التى تناولت الهيولية، لم يحظ بحث بالرجوع إليه كما حظى بحث "السريان المحدد اللادورى *Deterministic Nonperiodic Flow*" وعلى مدى سنوات، لم يثر شكل خيال المبدعين كما أثار ذلك الشكل العجيب ذو الجناحين، والذى عرف باسم "جاذب لورنز *Lorenz attractor*"، ذلك الشكل الذى كشف عن مدى ثراء الهيولية.

ولكنه أمر لم يتضح إلا للقليلين وقتها، ويتذكر لورنز كيف عقب زميل له على الشكل مبتسما: "إنك تعلم إن تيارات الحمل لا تتصرف هكذا، بالتأكيد سوف يصل النظام إلى نقطة استقرار". وبعد عدة سنوات، يُروى عن نفس الزميل، بعد أن بنى بنفسه عجلة لورنز المائية، قوله: "لقد فاتتنا جميعا وجهة نظر لورنز وقتها، فهو لم يكن يفكر بنفس نمط تفكيرنا، لقد كان يبحث على أساس نظم مجردة عامة، تعبر بصورة ما عن السلوك الواقعى للعالم الخارجى."

إن رجل الشارع يعرف مدى ضيق التخصصات العلمية، فمن النادر أن يقرأ عالم بيولوجيا وعالم فيزياء، ولا عالم فى البيئة وعالم رياضيات، نفس البحث، ولكن أبحاث الهيولية هى ما وحد بين كافة أفرع العلم على اختلاف مناهجها.

ولكن لورنز كان عالما فى الطبيعة الجوية، ولذا لم ينتبه الكثيرون وقتها إلى البحث المنشور فى الصفحة ١٣٠ من المجلد العشرين فى مجلة "**علوم الهواء الجوى** *Journal of the Atmospheric Science*."

[i] رياضى شهير، من أشد المتحمسين لمبدأ التحديدية فى العلم– المترجم

[ii] مبدأ وضعه عالم الفيزياء وأحد مؤسسى النظرية الكمية فيرمر هايزنبرج، مفاده أن الجسيمات دون الذرية لا تخضع للقوانين بصورة صارمة، كما تفعل الأجسام المرئية، بل بصورة احتمالية لا يمكن حسابها يقينا. فحركة الأرض حول الشمس تحكمها قوانين نيوتن، ويمكن التنبؤ بها إلى ملايين من السنين قادمة، أما حركة الإلكترونات فى مدارها حول نواة الذرة فهى احتمالية، فلا يمكن القول بأن هذا الإلكترون بالذات سوف يكون فى هذا الموضع بالذات بعد فترة من الزمن.

ويجب التنويه إلى أن عدم القدرة على التنبؤ الصارم للظواهر الكمية بناء على هذا المبدأ يختلف فى جوهره تماما عن عدم القدرة على التنبؤ للظواهر الهيولية. ففى الحالة الأولى يمثل مبدأ عدم اليقين تمردا على الفكر التحديدى الذى تبنّاه نيوتن ولابلاس ومن تبعهما، أما فى حالة الهيولية فعدم القدرة على التنبؤ يكون بسبب الطبيعة الهيولية للظاهرة كما سيأتى شرحها فى ثنايا الكتاب، بينما هذه الظواهر خاضعة، من حيث المبدأ، لقوانين نيوتن التحديدية – المترجم

[iii] رياضى يرجع إليه الفضل فى وضع تصور للحاسوب فى تصميمه الحديث، حيث قسّم عملياته الأساسية إلى: إدخال input، معالجة processing، إخراج -output المترجم

[iv] يقصد بالتقارب فى هذا السياق أن التغيرات التى تطرأ على ظاهرة ما تخمد تدريجيا إلى أن يعود النظام إلى نقطة الاستقرار التى كان عليها قبل التغير، وبهذا المفهوم يعتبر التقارب سمة للنظم المستقرة. – المترجم

[v] جدير بالذكر أن الحاسبات فى هذا العهد لم تكن تتعامل مع الرسومات. – المترجم



ثـــورة علميـــة

يصف مؤرخ العلوم **توماس كُون** Thomas Kuhn تجربة أجراها عالمان نفسيان فى الأربعينيات، فيها عرضا على كل واحد من الخاضعين للتجربة مجموعة من أوراق اللعب، طالبين منهم أن يسموا ما رأوه من أوراق. كانت هناك خدع فى الأوراق، كأن توجد أوراق حمراء بطبيعتها، كالديناري، سوداء.

حين كانت فترة العرض للأوراق وجيزة، كانت إجابات المختبرين تلقائية، فليس فى الاختبار ما هو أيسر. لم يشعر أحد بوجود أى شذوذ عن المألوف. ولكن حين عرضت الأوراق لمدة أطول، بدأ الأشخاص يترددون فى الإجابة. لقد وعوا وجود مشكلة ما، ولكن دون أن يحددوها. قد يقول أحدهم إنه قد لمح شيئا غريبا، كوجود إطار أسود حول ورقة ديناري.

وتدريجيا، حين كان الوقت متاحا بدرجة أكثر، أدرك الكثيرون من المختبرين الأخطاء، ولكن ليسوا جميعا. لقد عانى البعض منهم من عدم تركيز أدى بهم للشعور بالألم. قال أحدهم: "ليس بإمكانى تحديد النوع، رباه، إننى حتى لا أعلم الآن ما هو شكل الأوراق الأصلى".

والعلماء، حين يتعرضون للمحات سريعة غير مؤكدة لأعمال الطبيعة، لا يكونون أقل تعرضا للبلبلة والاضطراب النفسى حين يجدون فيها شيئا من الشذوذ، بينما هذا الشذوذ بالذات، حين يعدِّل من نظرة العلماء التقليدية، يرجع له الفضل فى تحقيق الثورات العلمية. هذا هو رأى كون، وتؤيِّد قصة الهيولية هذا الرأى.

لقد أثار رأى كون عن طريقة تحقيق الثورات العلمية، حين نشره فى الستينات، موجة من الاستياء وموجة من الإعجاب، لم ينتهيا إلى وقتنا هذا. لقد وجه طعنة نجلاء للرأى التقليدى الذى يذهب إلى أن التقدم العلمى يتحقق فقط بتراكم المعرفة، كل اكتشاف يضاف لسابقيه، بحيث لا تنبع النظريات الحديثة إلا حين تتطلب الاكتشافات الجديدة ذلك. لقد قلل من شأن النظرة للعلم كعملية منتظمة من التساؤلات وإيجاد

الإجابات، حين أوضح جلياً الفرق بين العلم فى مساره التقليدي، والذى تقوم به الأكثرية من العلماء، وبين أعمال القلة من غير التقليديين، والذين يخرجون عن التفكير النمطى المألوف، وبهم تتحقق الثورات العلمية. لقد لمز بقوله العلماء كأناس يخضعون للمنطق بشكل كامل.

إنه يرى أن العمل المعتاد للعلماء هو أن يزيدوا من الصرح المقام بالفعل ارتفاعاً وعلواً، بالسير قدما على نفس النهج المرسوم في المجال، ويعبّر عن ذلك بالقول: "فى الظروف العادية لا يكون الباحث شخصا مبتكراً، بل حلالاً للألغاز، واللغز الذى ينكب على حله يكون مصاغا من قبل، وقابلاً للحل، على نفس النمط العلمى التقليدي".

ثم تأتى الثورات؛ طريق جديد ينفتح حين تُسَد السبل. غالباً ما يكون للثورات جانب يجمع بين أكثر من مجال، فاكتشافاتها تأتى غالبا من أناس يلعبون خارج الحدود المألوفة لمجالهم، فالموضوعات التى تشغل بالهم غير معترف بها فى مجالات التخصصات التقليدية. كثيرا ما تُرفض اقتراحاتهم، وتُعاد أوراقهم لعدم الصلاحية للنشر، بل هم أنفسهم يكونون في حيرة من أمرهم، ولكنهم يقبلون المخاطرة.١ إن الصورة الرومانسية التى يعرضها كُون للثوريين من العلماء أنهم متحررو التفكير، يعملون على انفراد، غير قادرين على شرح ما يفكرون فيه أو يهدفون له، أو حتى خائفون من إخبار قرنائهم به، ولقد تحققت هذه الصورة فى قصة الهيولية أكثر من مرة.

كل رائد من رواد هذا العلم لديه قصة عن الإحباط الذى تعرض له، أو العداوة التى ووجه بها. الباحثون الجدد حُذّروا من فقد مستقبلهم العلمى إذا أصروا على الكتابة فى مجال لم يُعترف به بعد، وليس للمشرفين عليهم معرفة به. يسمع أحد الباحثين فى البيولوجيا عن نوع جديد من الرياضيات، يراه شيقا وصعبا فى نفس الوقت، فيُشغف به، ولكنه لا يستطيع إخبار زملائه بما يفعل. أساتذة مخضرمون تنتابهم أزمة منتصف العمر، فيقامرون بالعمل – تحت تأثير سحر الجديد من الأفكار – فى مجال يعلمون أن زملاءهم لا يفهمونه أو ينكرونه. لقد قال فريمان دايسون Freeman Dyson، عالم الفيزياء الشهير، فى السبعينات إن خبر الهيولية كان له وقع الصدمة الكهربية عليه، بينما قال آخرون إنهم قد عايشوا لأول مرة فى حياتهم العلمية تحولا حقيقيا فى نمط التفكير العلمى.

وكم كانت حيرة الرواد الأوائل لعلم الهيولية بشأن كيفية صياغة أفكارهم، والتى غالبا ما كانت تعانى من عدم إمكان إرجاعها لمجال تقليدى يمكن أن تنشر تحت ظله. فعلى سبيل المثال، قد يكون البحث تجريديا، ولكن ليس بالقدر الذى يبرر نشره كبحث

فى الرياضيات، وتجريبيا، ولكن ليس بالقدر الذى يكفى لنشره كبحث فى الفيزياء. ويرى البعض أن الصعوبة فى نقل أفكار هذا العلم، وما ووجه به من مقاومة عنيفة من التقليديين من العلماء، تبين بجلاء مدى الجدة والثورية فيه. إن الأفكار الضحلة سهل استيعابها، أما التى تتطلب من الناس أن يغيّروا من أنماط تفكيرهم فمدعاة للكراهية والعداء.

لم يدرك العلماء السائرون على الدرب التقليدى بزوغ العلم الجديد إلا لماما، ووقف البعض منهم، خاصة فى مجال ديناميكا الموائع، موقفا عدائيا صريحا، بداية باتهام الهيولية بكونها مجرد أفكار فجة وغير علمية، ثم بكونها تعتمد على نوع من الرياضيات مبهم وغير معترف به.

ومع ازدياد الباحثين فى علم الهيولية، استمرت بعض المراكز العلمية فى قفل الباب أمامهم، بينما رحبت بهم مراكز أخرى، ووضعت بعض المجلات العلمية قواعد غير مكتوبة برفض المقالات التى تتناولها، بينما قبلت ذلك مجلات أخرى صراحة. وبحلول منتصف الثمانينات، كان رواد الهيولية قد احتلوا مراكز علمية مرموقة، وسارعت المراكز العلمية إلى إنشاء أقسام فى "الديناميكا غير الخطية nonlinear dynamics"، و"النظم المعقدة complex systems".

لم تعد الهيولية مجرد نظرية، بل طريقة أيضا، ليست مجرد مجموعة أفكار تُعتنَق، بل وسيلة لتنفيذ العلم. لقد خلقت الهيولية تقنياتها الخاصة بها مستخدمة الحاسوب، ليس بالضرورة فائق القدرة من طراز كراى أو سيبر، بل الأجهزة الشخصية المتواضعة منها. بالنسبة لعلماء الهيولية، أصبحت الرياضيات علما تجريبيا، قوامه الأشكال الرسومية التى تظهر على شاشة الحاسوب، والذى حل فى هذا العلم محل المعامل فى المجالات العلمية الأخرى.

آمال جديدة، أساليب جديدة، والأهم من ذلك، طريق جديد للرؤية. إن الثورات لا تأتى متدرجة، بل تحل بسببها نظرة للطبيعة محل أخرى. المسائل القديمة يُنظر إليها من منظور جديد، ومسائل جديدة تبدو للمرة الأولى. شيء أقرب لتغيير الأدوات الصناعية لنمط جديد من الإنتاج.

■ ■ ■

كان فأر التجارب للعلم الجديد هو البندول، الشعار التقليدى للميكانيكا، مثال للحركة المقيّدة، ورمز للانضباط. يتحرك ثقله بحرية من جهة لأخرى، هل ثمة شيء أكثر منه استقراراً فى الحركة، وأبعد منه عن الاضطراب؟

فى حين كان لأرشميدس حمّامه، ولنيوتن تفاحته، **كان لجاليليو** ثريًا الكنيسة، تتأرجح فى رتابة لليمين واليسار، مرسلة رسالتها إلى إدراكه. وما لبث البندول أن تحول إلى أداة لضبط الوقت، مدخلة الحضارة الغربية فى طريق لا رجعة فيه. إن كافة الساعات تقريباً، على اختلاف أحجامها (إلى ظهور ساعات الكوارتز) تعتمد على نظرية البندول بصورة أو بأخرى، وتقريباً ترجع أية حركة ترددية على الأرض إلى أحد أقارب البندول. الدوائر الإلكترونية تصور بمعادلات تشابه تماماً معادلات البندول، ورغم أن المذبذبات الإلكترونية أسرع آلاف المرات، إلا أن الأساس الفيزيائى واحد. وبحلول القرن العشرين، أضحى البندول من المسائل التى تدرس فى المراحل المتوسطة من التعليم، لا يستدعى ما هو أكثر مستوى.

ولكن البندول كان لا يزال لديه ما يعطيه. حين رآه جاليليو أحس فيه بترددية يمكن قياسها، احتاج لتفسيرها أن يقوم بثورة علمية فى تحليل الحركة، فاستعان بأصدقائه لكى يقوموا بقياس الترددات على مدى أربع وعشرين ساعة، فيما يعتبره الكثيرون ميلاد العلم التجريبى كما عرفه العلم بعد ذلك. وقد أحس جاليليو بتلك الترددية لأنه كان قد كوّن بالفعل نظرية تتنبأ بها. لقد رأى ما لم يره علماء الإغريق؛ إن الأجسام المتحركة تحاول أن تستمر فى حالة الحركة، ولتغيير تلك الحالة مقدارا أو اتجاها يجب تدخل قوة خارجية، كالاحتكاك مثلا.

والواقع أن نظريته كانت من القوة بحيث أعطته إحساسا بترددية غير موجودة عمليا، لقد اكتشف أن البندول يستغرق نفس زمن التردد بصرف النظر عن سعة تردده، فالبندول الذى يقطع مسافة أكبر فى الحركة يفعل ذلك بدرجة أسرع بالضبط لكى يتزامن مع آخر أقل منه أرجحة. ولكن الترددية التى رآها جاليليو ليست إلا حالة تقريبية، فحركة البندول تتضمن قدرا من اللاخطية بسبب المعوقات؛ مقاومة الهواء والاحتكاك، اختار أن يتجاهلها حتى يستطيع وصف الحركة الترددية وصفا نظريا.

ويدرك طلاب القرن العشرين أن اللاخطية تستعصى على الحل، وهو أمر صحيح، وأنها تستبعد لعدم أهميتها، وهو أمر غير صحيح. فالعلماء لا يمكنهم أن يفهموا الاضطرابات إلا بفهمهم للبندول، ولكن بصورة لم تكن متاحة فى مطلع هذا القرن. وحين بدأت الهيولية فى ربط مجالات العلم المختلفة، اتسع نطاق تطبيق الحركة البندولية ليشمل العديد من صور التحليل الأخرى، من التوصيل الفائق إلى **وصلة جوزيفسون** Josephson junction[ii] وقد أظهرت بعض التفاعلات الكيميائية تصرفات أشبه بالبندول، وكذا ضربات القلب. ولم تقف الاحتمالات غير

المتوقّعة عند هذا الحد، فكما كتب أحد الفيزيائيين أنها قد تمتد إلى: "الطب النفسى والعضوي، والتحليل الاقتصادى، وربما تطور المجتمعات".

تصوّر أرجوحة فى ملعب، تتعاجل وهى هابطة، ثم تندفع صاعدة، وتفقد أثناء ذلك قدرا من طاقتها نتيجة المعوقات، وفى نفس الوقت تأخذ دفعة من مصدر خارجي. يخبرنا إحساسنا بأن الأرجوحة سوف تستمر فى الحركة، صاعدة إلى نفس الارتفاع كل مرة، وهو ما يحدث عادة، ولكن الاحتمال الآخر موجود، أن تتحول الحركة إلى حركة شاذة، تتأرجح بين الارتفاعات المختلفة، لا تستقر أبدا عند إيقاع واحد، ولا تكرر نفسها مرتين.

هذه الحركة الشاذة المفاجئة تأتى من الاعتمادية التبادلية التى شرحناها فى الفصل السابق، والتي تتمثل فى سريان للطاقة دخولا وخروجا فى الحركة الترددية، فهى حركة مُخمدة ومُحفَّزة فى نفس الوقت، مخمدة بسبب المعوقات، ومحفزة بسبب ما تحصل عليه من دفع خارجي. والعالم الطبيعى ممتلئ بمثل هذا النظام، فالطقس مثلا، نظام مخمد بسبب احتكاك الهواء والماء وتسرب الحرارة فى الفضاء، ومحفّز بالطاقة الشمسية.

ولكن عدم القدرة على التنبؤ لم يكن هو الدافع للعودة لدراسة الحركة البندولية بجدية فى الستينات والسبعينات، بل مجرد السبب فى جذب الانتباه. فدارسو الديناميكية الهيولية قد وجدوا أن التصرفات غير المنتظمة للنظم البسيطة تتصرف كعمليات خلاّقة، فهى تنتج التعقد، بما فيه ثراء فى الأنماط المنتظمة، حينا مستقرة وحينا غير مستقرة، حينا محدودة وحينا غير محدودة، ولكنها دائما ممتلئة بالحياة التى تأخذ بالألباب، ولهذا السبب يحلو للعلماء اللهو بالألعاب.

من ذلك لعبة شائعة تسمى **البندول الكروى**، لا يتحرك فقط جيئة وذهابا، بل فى أى اتجاه، وتوزع مجموعة من المغناطيسات على قاعدته تجذب الثقل كلما اقترب من إحداها. وتكمن الفكرة فى ترك الثقل يتحرك، ويخمّن المرء أى المغناطيسات سوف يفوز. حتى مع الاكتفاء بثلاثة مغناطيسات على شكل مثلث، يصعب التخمين تماما. ستجد الثقل يتذبذب بين المغناطيس الأول والثاني، ثم بين الثانى والثالث، وما أن يلوح أنه سوف يستقر عند الثالث، حتى تراه يقفز عائدا للأول.

لنفرض أن عالماً أراد منك توقيع هذه المواضع على خريطة، على النحو التالي: خذ نقطة بداية، وأمسك بثقل البندول عندها، ثم أرسله، ثم لون موضع هذه النقطة على

الخريطة باللون الأحمر أو الأخضر أو الأزرق، بحسب أى من المغناطيسات ينتهى إليه الثقل. كرر العملية عند نقطة بدء أخرى، إلى أن تنتهى من رسم الخريطة التى تبيّن العلاقة بين كل نقطة ابتداء والمغناطيس الذى ينتهى إليه الثقل. من المتوقع أن تجد منطقة من الخريطة ملونة باللون الأحمر، وأخرى بالأزرق، وثالثة بالأخضر، وهذا حق. ولكن المفاجأة هى أنك سوف تجد مناطق تتداخل فيها الألوان، بحيث تجد بجوار كل لون نقاطا من اللونين الآخرين. ومهما بالغت فى التكبير أو التصغير، فإن التداخل مستمر على كافة درجات الدقة فى التمحيص. هذه هى المناطق المعّبرة عن حالة الهيولية، والتى يصعب فيها التنبؤ بمآل الثقل.[iii]

كان الرأى التقليدى بالنسبة للنظم الديناميكية أنه بمجرد كتابة المعادلات للنظام، يتحقق فهمه تماما. فهل ثمة من وسيلة أفضل لتمثيل النظام؟ فى حالة الأرجوحة، تربط المعادلات بين زاوية الأرجوحة وسرعتها والاحتكاك والقوة الدافعة. ولكن بسبب لمحة اللاخطية فى النظام، قد يجد الباحث نفسه فى حيرة كاملة عند الرد على سؤال عملى مرتبط بمستقبل النظام. ويمكن للحاسوب تمثيل النظام، والقيام بالعمليات الحسابية بسرعة فائقة، ولكن التمثيل الحاسوبى له نقطة ضعفه، حيث إن درجة التقريب مهما بلغت ضآلتها لا بد وأن تتراكم سريعا، بسبب الحساسية المرهفة للظروف الأولية، وسرعان ما تختفى الإشارة الأصلية، ولا يتبقى إلا التشويش.[iv]

أحقا ذلك؟ لقد صادف لورنز اللاتنبئية، ولكنه وجد نمطا أيضا. وقد وجد غيره أيضا أشكالا مقترحة فى نظم تبدو فوضوية. لقد كان مثال البندول من البساطة لدرجة أنه يمكن التغاضى عنه، ولكن من رفض ذلك، وجد فيه رسالة ذات مغزى هام، إن العلماء بإمكانهم فهم الحركة البندولية تماما، ولكن ليس إلى المدى البعيد. إن الحركة واضحة على المستوى النظري، أما على المستوى العملى فغامضة أشد الغموض. إن الأسلوب التقليدي، المتمثل فى تجزئة النظم وعزلها، ثم إضافتها لبعضها البعض، قد أخذ فى الانهيار. بالنسبة للبندول، وللدوائر الكهربية، ولليزر، وللموائع، لم تعد المعادلات الأساسية هى نوع المعرفة المناسب فى كافة الأحوال.

بمرور الستينات، حقق بعض العلماء بعد لورنز اكتشافات مشابهة، كحالة فلكى فرنسى يدرس حركة المجرات ومهندس يابانى يدرس الدوائر الإلكترونية. ولكن أول دراسة منهجية لمحاولة فهم كيفية اختلاف التصرفات الشاملة للنظم عن التصرفات الجزئية كانت على يد الرياضيين، من بينهم **ستيفان سمول** Stephen Smale من جامعة كاليفورنيا. لقد سأل أحد الباحثين الشبان ذات يوم عن مجال دراسة سمول،

وكانت الإجابة مفاجأة له: "المذبذبات oscillators". إن هذا الموضوع قُتل بحثا، وهو يُدَرس لطلاب ما قبل التخرج، فكيف برياضى فذ أن يشغل به نفسه؟ لم يدرك السائل إلا بعد عدة سنوات أن سمول كان يبحث فى الخصائص غير الخطية، أى المذبذبات الهيولية، وأنه يرى أشياء تعلّم العلماء طويلا ألا يروها.

■ ■ ■

اعتنق سمول فى البداية تصورا خاطئا، فقد بين بعبارات رياضية قوية أن كافة النظم الديناميكية لا بد أن تستقر على تصرف مألوف، ثم سرعان ما أدرك أن الأمور لا تسير بهذه البساطة.

كان سمول لا يقوم بحل مسائل رياضية فقط، بل يضع مسائل لغيره لحلها. لقد استغل بنجاح باهر فهمه للتاريخ وقوة حدسه عن الطبيعة ليعلن فى عبارات رصينة قاطعة، أنه آن الأوان للمسائل التى ضُرب عنها صفحا أن تحظى بوقت الرياضيين. وكما يفعل رجال الأعمال، قام بحساب المخاطرة، ثم وضع استراتيجيته. كان يُمثّل قائدا للمسيرة، أينما تولى تبعه الناس. ولم تقتصر شهرته على وضعه العلمي، فقد اشتهر عنه حملاته الشعواء ضد حرب فيتنام، لدرجة تنظيم جهود تهدف إلى إيقاف القطارات التى تحمل الجنود التى تمر بكاليفورنيا. وفى الوقت الذى أصدرت فيه المحكمة أمر الاستدعاء له، كان مُتجها إلى موسكو حيث حاز أعلى وسام علمى هناك؛ والمسمى Field Medal.

وكانت زيارته لموسكو حادثة تضاف إلى أسطورته، خمسة آلاف من الرياضيين الذين يلهبهم الحماس والإثارة للقائه مجتمعون لتحيته، وكان رجال المخابرات على أعلى درجة من التوتر لهذا التجمع. وَشنّ سمول هجوما حادا على تدخل أمريكا فى فيتنام، وقبل أن يتمكن مستمعوه من الابتسام طربا، تحوّل هجومه إلى الاتحاد السوفيتى لكبته الحريات العامة وغزوه للمجر وتشيكوسلوفاكيا. وسيق لمكتب الاستخبارات على الفور. وحين عاد لبلاده، كانت منحته العلمية قد ألغيت.

كان مناط فخره العلمى هى أبحاثه فى الطوبولوجيا، فرع من الرياضيات ازدهر فى القرن العشرين، ووصل أوجه فى الخمسينات. وهو علم يهتم بدراسة السطوح، وما يحدث لها من التواءات أو انبعاجات أو غير ذلك من تغيرات، فهو علم الهندسة المطاطية. وهو لا يتعامل معها كأشكال ذات بعدين أو ثلاثة، كما هو الحال مع الهندسة الإقليدية العادية، بل بعدد أكبر من الأبعاد تعز على التخيل. وقد شيّد سمول لنفسه فيه مركزا متميزا بحله معضلة من أعوص معضلاته، تسمى معضلة بوانكريه.

ويعود كلا العلمين، **الطوبولوجيا** والنظم الديناميكية، إلى العالم **هنرى بوانكريه Henri Poincaré** الذى رأى فيهما وجهين لعملة واحدة. لقد كان فى مطلع القرن العشرين آخر الرياضيين العظماء الذين جعلوا التخيل الهندسى قادراً على التعبير عن قوانين الحركة الفيزيائية. وكان أول من أدرك احتمال الهيولية[v]، مشيراً فى كتاباته إلى نوع من عدم التنبئية على شاكلة ما اكتشفه لورنز بعد ذلك. وبعد وفاة بوانكريه، فى الوقت الذى ازدهرت فيه الطوبولوجيا، اضمحلت الدراسات الديناميكية، بل غاص الإسم فى زوايا النسيان. والعلم الذى عاد إليه سمول رسميا هو المعادلات التفاضلية، وهى معادلات تصف كيفية تغيّر النظم. والأمر التقليدى أن ينظر الباحث لكل عامل من العوامل على حدة، ولكن سمول، مثل بوانكريه من قبل، أراد أن ينظر إليها نظرة شاملة، بمعنى أن يفهم عالمها كله فى لمحة واحدة.

وتسمح أية مجموعة من المعادلات التى تصف نظاما ديناميكياً معيناً –كمعادلات لورنز مثلا– بتحديد عدة معاملات ابتدائية. ففى حالة الحمل الحرارى، يكون أحد هذه المعاملات لزوجة السائل. والتغير الكبير فى عامل ما يمكن أن يؤدى إلى تغيرٌ مماثل فى تصرُّف النظام، كأن يغير حالة الاستقرار إلى حالة دورية. ولكن الفيزياء قد افترضت أن التغيرات الطفيفة فى معامل ما سوف تؤدى فقط إلى فروق ضئيلة فى الأرقام، وليس إلى تغيرات نوعية فى التصرفات.

ويؤدى ربط الطوبولوجيا بالنظم الديناميكية إلى إمكان استغلال الشكل[vi] فى المساعدة على تصورّ مدى التصرفات بأكملها. وللنظم البسيطة، قد يكون الشكل عبارة عن نوع ما من الأسطح المستوية؛ وللنظم المعقدة سطحا متعدد الأبعاد، كل نقطة فيه تمثّل حالة النظام فى لحظة معينة من الزمن. وبمرور الزمن، تتحرك هذه النقطة، راسمةً مساراً عبر ذلك السطح. ويمثل انحناء بسيطا فى هذا السطح تغيير معاملات النظام، كأن يكون السائل أكثر لزوجة، أو أن يدفع البندول بقوة أكبر. والأسطح التى تبدو متقاربة الشكل، تعطى تصرفات متقاربة. فإذا ما أمكنك تصور الشكل، أمكنك فهم النظام.

وحين تحّول سمول إلى النظم الديناميكية، كانت الرياضة البحتة تُدَرس مترفعة عن التطبيقات العملية. ورغم أن منشأ الطوبولوجيا كان قريبا من الفيزياء، إلا أن هذا المنشأ كان مُجهّلاً لدى الفيزيائيين، وكانت الأشكال تدرس لذاتها فقط. ولكن سمول بدأ يعتقد فى أن الطوبولوجيا قد تحمل شيئا من التطبيق فى مجال الفيزياء، بالضبط كما كان ينوى بوانكريه فى مطلع القرن.

وتصادف أن كانت أوائل مساهمات سمول مبنيّة على تصوّره الخاطئ، وهو أنه من المحتمل لنظام ما أن يتصرف بصورة شاذة، ولكن مآله إلى **الاستقرار stability**. ويقصد بالاستقرار فى هذا المضمار ألا تؤدى التغييرات الطفيفة إلى زعزعة النظام. خذ مثلا قلم رصاص واقفا على سنّه، توجد معادلة تصف هذا الوضع من الناحية النظرية، على أساس أن مركز الثقل فوق السن مباشرة. ولكن هذا الوضع غير مستقر، لأن أى تغير طفيف سيؤدى لوقوع القلم. أما لو تصورنا قطعة رخام فى قاع محيط، فإن وضعها مستقر، حيث إن أى زحزحة لها سوف يتلوها عودتها إلى حالتها الأولى. وقد افترض الفيزيائيون أن أى نظام يمكنهم دراسته يجب أن يتميز بالاستقرار، حيث إن النُظم الواقعية تتعرض على الدوام للاضطرابات وعدم التأكد بالنسبة للعوامل المؤثرة. فإذا ما نشدت نظاما عمليا من الناحية الفيزيقية ومتماسكاً أمام الاضطرابات، فإن الفيزيائيين سيفهمون أنك تنشد نموذجا مستقرا على حالة ثابتة steady state.

وفى ١٩٥٩، حمل البريد لسمول أنباء سيئة. فالخطاب الذى جاءه من أحد زملائه يبيّن أن بعض النظم تستقر على حالة من الاضطراب، فإذا ما تعرّض النظام لتغيرات طفيفة، شأن كافة النظم الواقعية التى تتعرض على الدوام للتداخل والشوشرة، فلن تزول عنه هذه الحالة، فهو متماسك ومضطرب فى نفس الوقت. ودرس سمول الخطاب بعدم تصديق لم يدم طويلا.

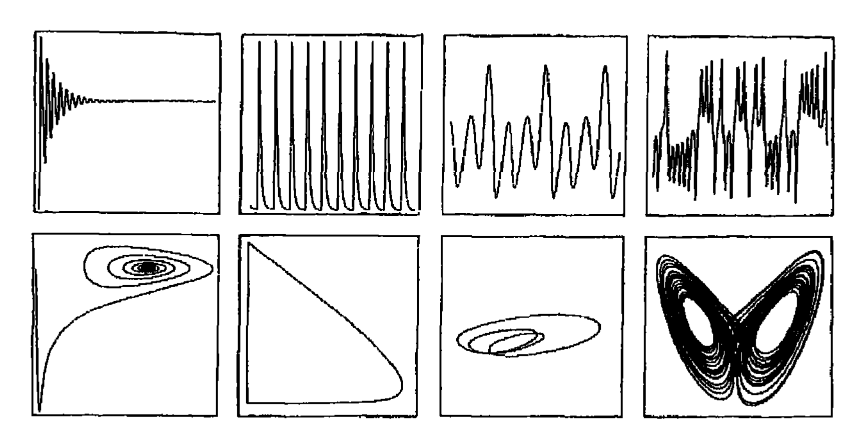
ليست الاضطرابات إذن هى بالضرورة عدم الاستقرار. فالنظام يمكن أن يوصف بالهيولية، وهى حالة مستقرة، إذا صمد نمط معين من عدم الانتظام أمام الاضطرابات الطفيفة. وكان نظام لورنز شيئا من هذا القبيل، ولكن الأمر اقتضى وقتا ما قبل أن يسمع سمول عن لورنز. فالهيولية التى اكتشفها لورنز، بكل ما فيها من عدم تنبئية، كانت مستقرة كقطعة الرخام فى قاع المحيط. يمكنك أن تقحم عليه ما تشاء من شوشرة، وأن ترجّه وتهزّه، وتتدخل فى حركته، ثم حين ينتهى كل ذلك، وتذوى الحالة الطارئة، يعود النظام إلى نفس النمط من عدم الانتظام. إنه على المستوى المحلى غير قابل للتنبؤ، وعلى المستوى الشامل مستقر. والنظم الديناميكية الواقعية تخضع لكم من القواعد المعقدة أكبر مما يتوقع أحد، ولكن النظام الذى حمله الخطاب كان بسيطا، اكتُشف لأكثر من جيل مضى، يمثل بندولا متخفيا، إنه دائرة كهربية مهتزة اهتزازا قسريا، كأرجوحة الطفل.

كان النظام مجرد صمام إلكتروني، درسه فى العشرينات مهندس يدعى **فان در بول** Van der Pol. وتُدرس ظواهر هذه الدوائر اليوم بواسطة جهاز يسمى

الأوسيلوسكوب[vii]، وهو ما لم يكن متاحاً وقت در بول، فكان يعتمد على الإنصات للترددات الصوتية ويميز ما يعتريها من تغيّر فى النغمات. وكان سعيدا باكتشافه الانتظام فى تلك التغيرات، عدا لحظات لم يكن يعرف لها تعليلا، فعزاها إلى الشوشرة التى تتعرض لها الخطوط التليفونية عادة. ولكنه كان قد تعرض فى الواقع لحالة من الهيولية لم يستطع إدراكها[viii].

ورغم ما كان عليه حدس سمول من خطأ، فإنه قاده على التو إلى طريق جديد لتصوّر التعقد للنظم الديناميكية تصورا شاملا. كان أسيلوسكوبه الوحيد هو ذهنه، ولكنه كان ذهنا قد تشكل لعدة سنوات بالنظر فى فضاءات الطوبولوجيا. لقد تمثّل سمول فضاء الطور phase space لمذبذب در بول. إن كل حالة فى لحظة معينة تمثل بنقطة فى فضاء الطور، فتحمل إحداثيات هذه النقطة فى ذلك الفضاء كافة البيانات عن تلك الحالة. وكلما تغيرت حالة النظام، تحركت النقطة إلى نقطة أخرى، وإذا كان التغير مستمرا، فإن النقاط ترسم مسارا فى فضاء الطور.

فإذا كان النظام مجرد بندول يتأرجح، فإن فضاء الطور يكون مجرد مستطيل ذى إحداثيين، قد يكون الرأسى منهما معبرا عن زاوية البندول، والأفقى عن سرعته. ومع تأرجح البندول يكون المسار منحنى مغلقا يتكرر على نفسه مع اتخاذ البندول نفس الأوضاع فى كل دوره.

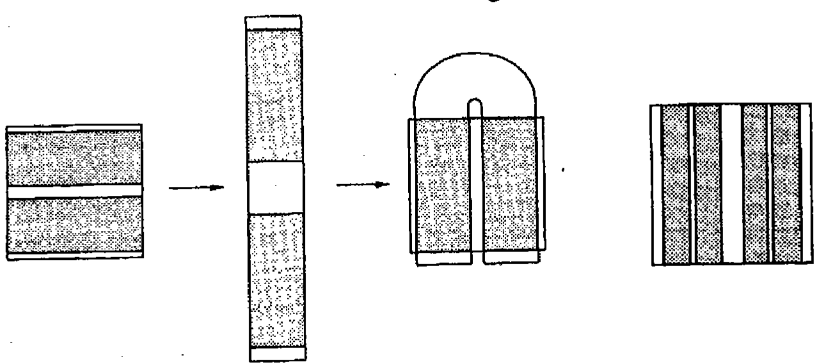


شكل ٢-١ تكوُّن الأشكال فى فضاء الطور: رسم المنحنيات التقليدية للتعبير عن التغير مقابل الزمن (أعلى) ورسم المسارات فى فضاء الطور (أسفل) وسيلتان بيانيتان

لتصوير تصرف النظم الديناميكية على المدى الطويل. النظام الأول (يسار) يتقارب إلى حالة الثبات، وتمثل كنقطة على فضاء الطور. النظام التالى دوري، يكرر نفسه بانتظام على فترات منتظمة، فيمثل فى فضاء الطور بشكل منغلق على نفسه يكرر نفسه بانتظام. الشكل الثالث يمثل نظاما دوريا ولكن بصورة أكثر تعقدا، وانعكس ذلك على فضاء الطور على صورة كم من الأشكال المنغلقة. النظام الرابع (أقصى اليمين) هيولى.

وبدلاً من أن ينظر سمول فى مسار معين، ركّز النَظر إلى تصرّف الفراغ كله خلال تغير الظروف المحيطة بالنظام، كأن يضاف إليه مزيد من الطاقة، أو تيشتت منه بعضٌ منها. وقفز حدسه من المضمون الفيزيائى للنظام إلى نوع جديد من المضامين الهندسية، وكانت عدته فى البحث هى التحولات الطبولوجية لأشكال فراغ الطور، حيث قد يحمل كل تغير مغزى فيزيقيا معينا؛ فانكماش الفراغ مثلا يعنى تشتت الطاقة، وليكن بسبب الاحتكاك، كبالون يفقد ما به من هواء إلى أن يستحيل نقطة، عندها يصل النظام إلى مرحلة التوقف التام. ولتمثيل التعقد الكامل لمذبذب در بول، أدرك أن فضاء الطور يجب أن يعانى من نوع جديد من التحولات المعقدة، وعلى الفور وجه فكرته عن تصور السلوك الشامل لنوع جديد من النماذج، عُرف فيما بعد باسم **نموذج الحدوة** horseshoe، أصبح صورة للنظم الهيولية لعدة سنوات تالية[ix].

ولأخذ صورة مبسطة عن حدوة سمول، خذ مستطيلا مُطّه ليأخذ شكل قضيب، خذ أحد نهايتى القضيب واطوه إلى الآخر، مكونا شكل C، كالحدوة، ثم تصور هذه الحدوة وقد ضمنت مستطيلا آخر يجرى عليه نفس الخطوات السابقة من التحولات، الانكماش والطى والمط، فيما يشبه عمل صانع الفطائر.



شكل ٢ - ٢ حدوة سمول: هذا الشكل للتحويل الطبولوجى يقدم أساسا لفهم خصائص الهيولية فى النظم الديناميكية. القواعد بسيطة؛ فضاء يُمط فى اتجاه ما

(تباعد فى المسارات فى فضاء الطور، تعبير عن دخول طاقة للنظام)، ثم يكمش فى اتجاه آخر (تقارب فى المسارات، تعبير عن تشتت الطاقة من النظام)، ثم يطوى، وتكرر العملية بصورة مألوفة لمن له دراية بصناعة الفطائر متعددة الطبقات. يمكن لنقطتين متجاورتين فى البداية أن ينتهيا متباعدتين.

وهكذا جعل سمول من حدوته نوعا فريداً من الأشكال الطبولوجية، تمثل من الناحية الرياضية ظاهرة الحساسية للظروف الأولية التى كان مقدرا للورنز أن يكتشفها خلال دراسته للطقس الجوى بعد عدة سنوات. فلو أنك اخترت نقطتين متجاورتين فى البداية، فإنك لا تدرى كيف يصير البعد بينهما فى النهاية، بعد كل عمليات المط والطى والانكماش.

وكان سمول يأمل فى البداية أن يكتفى بالمط والانكماش، دون اللجوء للطي، لفهم استقرار النظام، ولكن اتضح له أهمية الطى فى تمثيل ما يعترى النظام من تغيرات طارئة. وكان شكل سمول من أوائل أنوا ع من الأشكال أعطت للرياضيين والفيزيائيين أداةً لتصور الإمكانيات المختلفة للحركة. من وجهة نظر معينة كان الشكل يبدو مصطنعا بدرجة تجعله غير ذى فائدة، ولكن من جهة أخرى فقد بدا أنه شكل لاقى استحسان الرياضيين والفيزيائيين على السواء. وقد صلح هذا الشكل كنقطة للبداية، ففى خلال الستينات أحاط سمول نفسه بمجموعة من الرياضيين الشبان الذين كانوا يشاركونه الشغف بهذه الدراسة الجديدة للنظم الديناميكية. ولكن كان على عملهم أن ينتظر لعدة سنوات إلى أن يجذب انتباه مجالات الهندسية التطبيقية، وحين تحقق ذلك، أدرك الفيزيائيون أن سمول قد حوّل فرعاً من فروع الرياضيات إلى العالم الواقعي، لقد كان عصراً ذهبياً على حد قولهم. وقد عبر أحدهم عن هذا التطور الجذرى بقوله: "حينما بدأتُ حياتى كرياضى عام ١٩٦٠، وهو عهد ليس بالبعيد، كانت الرياضيات البحتة مرفوضة من قبل الفيزيائيين، إذ كان بين الطرفين قطيعة كاملة. لقد تبدّل هذا الوضع تماما منذ عام ١٩٦٨"؛ لقد أدرك الفيزيائيون والفلكيون والبيولوجيون بعد لأيٍ أن أخبارا هامة فى انتظارهم.

■ ■ ■

ظاهرة فلكية محيرة: إنها البقعة الحمراء الهائلة فى كوكب **المشترى**. تظهر على سطحه كدوّامة هائلة لا تتزحزح عن مكانها ولا تهدأ أبدا. لقد حيرت العلماء منذ أن بدت لأول مرة حين وجّه جاليليو تلسكوبه لهذا الكوكب، ولم تزد التحسينات فى

التلسكوبات حقيقتها إلا غموضا. وقد تعددت النظريات حولها؛ فقال البعض إنها تدفق من الحمم، ورأى البعض الآخر أنها قمر جديد فى طور التكوين، وذهب رأى آخر إلى أنها جسم طاف فى هواء الكوكب، وذلك حين لمح تزحزحا طفيفا تدريجيا فى موقعها، كما قال آخرون بأنها عمود من الغازات يخرج من فتحة على سطح الكوكب، وذلك حين رأوا أن البقعة رغم تحركها، لا تبتعد كثيرا عن موقعها.

وظن الجميع أن اللغز سوف يتكشّف بعد رحلة **فوياجير** عام ١٩٧٥، والتى أتت بالفعل بكم هائل من البيانات عنها، لكنها لم تزد العلماء إلا حيرة. فالصور كشفت عن رياح عاتية ودوّامات ذات ألوان، أصدق وصف لها أنها إعصار، إلا أنه يختلف عن الأعاصير الأرضية من عدة جهات. فأولاً يحصل الإعصار على طاقته نتيجة الحرارة التى تنبعث عندما تتحول الرطوبة إلى مطر، ولا رطوبة على المشترى. ثانياً، تدور الأعاصير فى حركة حلزونية؛ فى اتجاه عقارب الساعة تحت خط الاستواء وضد عقارب الساعة فوقه، وحركة البقعة ليست حلزونية، وأخيرا، وهو الأهم، تخمد الأعاصير بعد عدة أيام.

كما أن الصور بينت أن ماهية الكوكب مائعة بصفة أساسية، ليس له قلب صلب اللهم إلا إذا كان غائرا على بعد سحيق من السطح. فالكوكب أشبه بتجربة هائلة لديناميكية الموائع.

وهؤلاء الذين رأوا فى الاضطرابات فى ديناميكا الموائع مجرّد فوضوية عشوائية، لم يكن لديهم منطق يفسر وجود بقعة من الاضطراب مستقرة بهذه الصورة. والأدهى من ذلك أن فوياجير قد أتت بتفاصيل دقيقة عن تكوين البقعة، زادت الأمر حيرة، فهى عبارة عن اضطرابات لحظية على شكل دوامات لا تدوم لأكثر من يوم، ومع ذلك فهى فى مجموعها باقية مستقرة، فمن ذا الذى يضمن لها هذا الاستقرار؟

وذهب العلماء المحررون من فكرة الإعصار فى دراسة الظاهرة اتجاها آخر، ليجدوا تشابهاً مع ظواهر أخرى فى دوامات الخلجان والتيارات المائية. من هؤلاء العلماء كان **فيليب ماركوس** Phillip Marcus من جامعة كورنيل Cornell، الذى انكبّ على دراسة الصور التى وزعتها وكالة ناسا للبقعة الحمراء، ثم قام بوضع نموذج للكوكب على حاسوبه الفائق، مبنى على قوانين نيوتن ومبادئ ديناميكا الموائع. ولتمثيل جو المشترى فإنه استخدم خصائص الهيدروجين والهليوم من كتلة وكثافة، مع سرعة هائلة لدوران الكوكب حول نفسه تبلغ عشر ساعات للدورة الواحدة، مما يعنى قوة طاردة مهولة تغذى تلك البقعة.

وبينما كان جو الكرة الأرضية قد مُثِّل على حاسوب لورنز البدائي، الذى كان يخرج مخرجاته على هيئة سطور من الأرقام أو أشكال رسومية بدائية من الحروف، فإن جو المشترى قد مثل على حاسوب فائق القدرة، مكَّن من إخراج البيانات على صور شرائح شفافة ثم رسوم متحركة ملونة بألوان زاهية، أخذت بلب المشاهدين حين عرضها. إنه نظام ذاتي الضبط، يُخلق وينظم عن طريق الظواهر اللاخطية ذات الاعتمادية المتبادلة، إنه نظام هيولى مستقر "تدفق هيولى يمتص الطاقة كما الإسفنج" على حد قول ماركوس.

لقد تعوّد حين كان طالبا فى مجال الفيزياء أن يتعامل مع الظواهر الخطية، معتبرا أى اضطراب يعتريها مجرد خطأ من مصدر خارجى يجب إهماله. ولكنه خلافا لأقرانه الفيزيائيين كان قد استوعب درس لورنز، أن النظم التحديدية يمكن أن تنتج ما هو أكثر من ظواهر منضبطة، وتعلّم أن ينظر إلى الاضطراب من خلال نظرة أعمق، وأن يرى بداخله جزرا من الهياكل، وقد طبق هذا المنطق على بقعة المشترى الحمراء، على أساس أن النظم المعقدة يمكن أن تخرج ظواهر من الاضطراب المستقر والمتماسك. كان يتبع تقليدا حديثا يستخدم الحاسوب كأداة للاختبارات، ويرضيه أن ينظر إلى نفسه كطراز فريد من العلماء، ليس مجاله أساسا هو الفلك، أو ديناميكا الموائع، أو الرياضيات، بل إن مجال تخصصه هو الهيولية.

---

i أوضح مثال لموقف العلم التقليدى من الثورات العلمية ما حدث بخصوص النظرية الكمية والنظرية النسبية فى مطلع هذا القرن. فقد قدم ماكس بلانك نظرية الكمية فى ديسمبر عام ١٩٠٠، ولم يفز بجائزة نوبل عنها إلا عام ١٩١٧، أما أينشتاين فلم يحز على نظريتى النسبية الخاصة والعامة بجائزة نوبل على الإطلاق، بل حازها عام ١٩٢١ عن تطبيقه للنظرية الكمية فى أبحاث الضوء. ويعتبر عدم فوزه عن نظريتيه اللتين تعتبران بلا جدال أعظم فتح علمى فى تاريخ البشرية أمرا يؤخذ على العلم التقليدى فى مواجهة الأفكار الثورية والمتجددة – المترجم

ii وصلة مكونة من حاجز ضئيل بين ماءتين شبه موصلتين – المترجم

iii سوف تعرض هذه الظاهرة تفصيليا عند الحديث عن طريقة نيوتن (الفصل الثامن)، وكذا تُبيِّن بوضوح فى اللوحة الخاصة بذلك – المترجم

iv يستخدم المترجم كلمتي: تشويش، شوشرة، كمترادفين مقابل كلمة noise، وليس من فرق فى استخدامهما إلا ما قد يوحى به السياق – المترجم

v كان ذلك حينما أراد تحليل نظام فلكى يجمع بين ثلاثة أجرام تدور مع بعضها البعض، وكانت دهشته بالغة حين وجد النظام مستعص على التحليل الرياضي، حيث يصعب تماما متابعة تبادل الطاقة بين الأجرام الثلاثة، بل قد يحدث أن يستبد أحد الأجرام بالقدر الأعظم من الطاقة الكلية للنظام فينطلق فى الفراغ بقوة قد تقذف به خارج المجرة بأكملها، ويطلق على هذه الظاهرة ظاهرة "**المقلاع** slangshot" (تساءل البعض عن احتمال أن تلقى الأرض يوما ما هذا المصير، ولكن الدراسات حتى الآن مطمئنة، فالاحتمال يبدو بعيدا للغاية) – المترجم

vi يقصد بذلك فضاء الطور، وسوف يزيد المؤلف هذا الموضوع إيضاحا بعد قليل عند حديثه عن حدوة سمول. المترجم

vii جهاز ذو شاشة كشاشة التلفزيون، تظهر عليها الإشارات الكهربية – المترجم

viii سوف يعود المؤلف للحديث عن هذه الظاهرة فى الفصل الرابع–المترجم

ix لمزيد من توضيح الموضوع يراجع تطبيق هينون لهذا الأسلوب فى الفصل الخامس. المترجم



الحياة صعودٌ وهبوطٌ

أسماك مفترسة، وعوالق مائية شهية، غابات مطيرة تعج بزواحف لا حصر لها، وطيور تنزلق فى الهواء تحت ظلة من الأغصان المورقة، حشرات تطن، قوارض تتكاثر فى دورات من انتشار ثم انكماش رباعية السنوات فى ظل صراع على البقاء لا يعرف الرحمة. إن العالم يصنع معملاً بيئياً هائلاً، تتفاعل فى مرجله خمسة ملايين نوعا من الكائنات، أو لعلها خمسون مليونا؟ لا أحد من البيئيين يعرف على وجه الدقة.

لقد وضع البيولوجيون من ذوى التفكير الرياضى فى القرن العشرين مجالاً علمياً مستحدثا، هو البيئة، يُجرِّد الحياة من ظلالها واضطراباتها، ليعالج قضية **التناسل** فيها كنظام ديناميكي. فهم يستخدمون الوسائل الأولية للفيزياء والرياضة لوصف الزيادة والانكماش فى تعداد الأجناس، حين تتكاثر فى ظل بيئة محدودة المصادر الغذائية، وغنية بالأعداء الطبيعيين واحتمالات الأوبئة. هذا النظام البيئى المجرد إذا لم يكن فى الإمكان عزله عن الواقع فعليا، فهو قابل لذلك فى أذهان العلماء.

حين ظهر علم الهيولية فى السبعينات، كان قدر البيولوجيين أن يلعبوا فيه دورا خاصا. كانوا يستخدمون نماذج رياضية، ولكنهم يعلمون أيضا أن مثل هذه النماذج لا تمثل الواقع إلا بقدر كبير من التقريب. وبعبارة أخرى، فإن إدراكهم بمدى عدم دقة النماذج فى تمثيل الواقع، قد دفعهم إلى الأخذ بعين الاعتبار ما لدى الرياضيين فى تمثيل الشذوذ عن الأنماط التجريدية. فإذا كانت المعادلات المنضبطة يمكن أن تصف التصرّفات غير المنضبطة، فإن هذا يمس لديهم وتراً حساساً. إن المعادلات التى وضعت لدراسة التكاثر البيولوجى هى المقابلة لما يستخدم لدى الفيزيائيين لوضع النماذج التى تصف كونهم، على أن حيود الحياة الواقعية عن النماذج البيولوجية تجعل من هذه النماذج مجرد تصوير كاريكاتيرى للحياة بتعقيداتها، بالضبط كما تكون نماذج الاقتصاديين، وعلماء السكان، ومخططى المدن، وعلماء النفس، حين يحاولون وضع أساس رياضى قوى لوصف هذه العلوم الهلامية بطبيعتها. وبالنسبة

للبيولوجيين، حتى نموذج لورنز بمعادلاته الثلاث كان معقدا أكثر مما يجب؛ ثلاثى الأبعاد، متغير على الدوام، عصىّ التحليل.

واستدعت الحاجة وضع أسلوب آخر للعمل فى مجال **البيولوجيا**. إن الفيزيائى حين يبحث عن معادلة تصف تصرف الحالة قيد الدراسة، إما أنه يجدها فى بعض المراجع، أو يستنبطها من المبادئ الأولية. لنفرض أن الحالة هى بندولان مرتبطان عن طريق زنبرك، إنه يعلم تماما عن البندول، وعن الزنبرك، وهو وضع غير متاح للبيولوجي، فليس من المتصور له أن يستنبط المعادلة التى تحكم الظاهرة قيد البحث من مجرد التفكير فى أسلوب تكاثر الكائن الذى يتناوله. إنه مضطر للحصول على كمٍ كبير من البيانات، ثم يعمل الفكر حول طبيعة المعادلة التى تخرج النتائج التى حدثت بالفعل؛ ماذا يحدث لو وضعنا ألف سمكة من نوع كذا فى بركة محدودة الموارد الغذائية؟ وما يحدث لو أضفنا لها عددا من أسماك القرش، تلتهم سمكتين فى اليوم؟ ما الذى يحدث لفيروس يقتل بمعدل معين وينتشر بمعدل معين اعتمادا على حجم الأفراد من الكائنات؟ يحاول العلماء وضع أسئلة كهذه فى صورة مجردة مثالية، حتى يمكنهم التطبيق على معادلات صمّاء.

وقد تنجح هذه الوسيلة، فقد عرف علماء البيولوجيا شيئا عن تاريخ الحياة، كيف تفاعلت الحيوانات المفترسة مع فرائسها، كيف يتأثر عدد السكان بانتشار وباء ما. فإذا ما انفجر التعداد فى نموذج رياضى ما، أو وصل لحالة التوازن، أو انتهى للانقراض، فغالب الظن أن مآل التعداد الحقيقى سوف يتصرف بنفس الطريقة.

ومن آليات التبسيط المفيدة نمذجة العالم على أساس دراسة التغيرات فى فترات من الزمن، بدلا من متابعتها لحظة بلحظة، كما هو الشأن فى المعادلات التفاضلية. وبينما تشتهر المعادلات التفاضلية بالصعوبة، نجد أن المعادلة المعروفة باسم معادلة **الفروق اللوجستية** (التى سوف نتناولها بالشرح حالا) أبسط وأكثر ملاءمة فى الاستخدام لعمليات تقفز على مر الزمن من حالة لأخرى. ولحسن الحظ، تتصرف غالب الكائنات فى دورات قوامها سنة تامة، كأن تتزاوج فى فصل معين. فلمعرفة العدد المتوقع فى العام القادم من حشرة ما، قد يكفى أن تعرف العدد هذا العام.

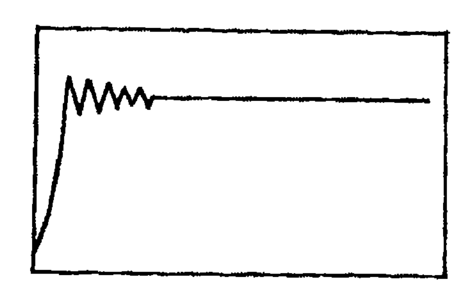
يمكن الوصول فى التبسيط إلى درجة تصور التزايد فى الأعداد على أنه يجرى بصورة خطية، أى مطردة بمعدل ثابت. فى هذه الحالة تكون المعادلة على الصورة: ص = م × س، حيث ص التعداد فى العام المقبل، س التعداد هذا العام، و "م" هو معدل التزايد، وليكن مثلا ١،١، فإذا كان التعداد هذا العام ٢٠٠٠٠ يكون فى العام المقبل

٢٢٠٠٠, من الواضح ما في هذا التبسيط من سذاجة، يسير فيه التكاثر مطّرداً أشبه بمبلغ يوضع في بنك ليتزايد للأبد.(١)

إن تطويراً أكثر واقعية للمعادلة يمكن أن يأخذ في الحسبان مُعدّل الوفيات الطبيعي، ثم معدل الوفيات نتيجة الافتراس أو المجاعات نتيجة التزايد الضخم. قد نتصور معادلة على النحو التالي: ص = م × س (١- س)أ. تلاحظ هنا أن الرمز س حين يكبّر، فإن المقدار (١ - س) سوف تقل قيمته، ولم يعد التكاثر بذلك مطردا بانتظام كالحالة السابقة. ويمكن للقارئ أن يجرى بعض التطبيقات على آلة حاسبة بسيطة، بأن يأخذ مقداراً ابتدائيا للرمز "س"، وليكن ٠,٠٢ وللمعدل، وليكن ٢,٧. سوف يجد القارئ أن التعداد قد استقر حول رقم يتراوح صعودا وهبوطا حول متوسط هو ٠,٦٣، وفي وقت الحساب اليدوي، قبل الآلات الحاسبة، لم يكن بالمستطا ع الوصول إلى مستوى أكبر في إجراء العمليات الحسابية.

وبحلول الخمسينات، كان البيولوجيون يبحثون عن صور معدّلة لهذه المعادلة، والتى عُرِفت باسم معادلة الفروق اللوجستيةII logistic difference equation. فهى قد طُبِّقت في استراليا على مزارع السمك. لقد عرف البيولوجيون أن المعامل "م" له أهمية بالغة في النموذج، وهو يماثل في المعادلات الفيزيقية المقابلة شيئا مثل كمية الحرارة، مقدار الاحتكاك، أو مقادير أخرى ليست جامدة الماهية، باختصار، ذات طبيعة لاخطية. وفي النظم البيئية قد يمثل هذا العامل خصوبة النوع. ويظل التساؤل قائما حول مدى تأثير مثل هذه العوامل على المصير النهائي للجنس. والإجابة الواضحة هي أن مقداراً صغيراً للعامل "م" سوف يجعل الجنس يستقر على مستوى صغير من التعداد. ولكن اتضح أن هذا لا ينطبق على كافة العوامل، لقد وجد بعض الباحثين أنه مع مقدار أكبر لبعض العوامل، تتحول الحالة إلى الهيولية.

بصورة غريبة، تأخذ الأرقام طبيعة شاذة، فهي تبدو مشوشة عند إجراء الحساب يدوياً. لا ترتفع الأرقام إلى مالا نهاية بالطبع، ولكنها أيضا لا تستقر عند مستوى ثابت. ولا يتصور أن يكون لدى باحث يجرى الحسابات يدوياً لا الرغبة ولا المقدرة في الاستمرار في إجراء عمليات حسابية تفرز أرقاماً لا تبشر بالاستقرار عند وضع ثابت. كل ما تصوره البيولوجيون هو أنه إذا كانت الأرقام تتأرجح بهذه الصورة، فإنها لا بد تفعل ذلك حول رقم توازن معين، فلم يخطر على بال أحد أن مثل هذا التوازن غير موجود.



شكل ٣ - ١ تعداد يستقر على حالة التوازن بعد ارتفاع مفاجئ ثم عدة اهتزازات مرحلية.

لم تعترف المراجع البيولوجية بإمكان ظهور حالة الهيولية فى نظمها، ليس طبعا لعدم الاعتراف بأن هذه النظم قد تتصرف أحيانا بطريقة شاذة، ولكن من منطلق تصور أن هذا الشذوذ لا علاقة له بالنماذج الرياضية الموضوعة، أو يفترض وجود عوامل أخرى لم تُؤخَذ فى الحسبان، كالتوزيع العمري، أو نسبة الجنسين، أو عوامل أخرى جغرافية أو بيئية. أو ربما يرجع السبب إلى عدم الدقة فى آلة الحساب. كان تصور الوضع النهائى المستقر هو المسيطر على الذهن فى كافة الأحوال. وفى كافة الأحوال، فإن الأسلوب نفسه لم يكن مثيرا، فليس فى رغبة أحد إضاعة الوقت فى حسابات لا تفرز ظواهر مستقرة، فالنظام هو بغية البحث العلمي الأولى. خاصة وأنه ما من أحد من الباحثين إلا ويدرك أن نموذجه ليس إلا تقريبا فجّاً للنظام الواقعي، فما الهدف من إفاضة البحث فيه؟

■ ■ ■

بعد ردح من الزمن، ردد الناس أن **جيمس يورك** James York، من معهد العلوم الفيزيائية والتكنولوجيا Physical Science and Technology بجامعة ماريلاند، والذى رأسه فيما بعد، هو الذى اكتشف معادلات لورنز، وأنه هو من أعطى علم الهيولية اسمه، والشق الثانى من المقولة صحيح.

كان يورك رياضياً يعجبه أن ينظر إلى نفسه كفيلسوف، رغم خطورة مثل هذا الظن على مستقبله المهني. كان يضمر الإعجاب بسمول، ولكنه، كالكثيرين، يرى أنه من الصعب أن يسبر غوره، ولكنه على خلاف الكثيرين يعرف السبب لذلك. كان من نوع من

الرياضيين يرى أنه من الواجب أن يضع أفكاره موضعا يستفاد منها فيه، فقدم تقريرا عن انتشار مرض السيلان أقنع الحكومة الفيدرالية بتعديل خطتها فى مواجهة هذا المرض، كما قدّم شهادة علمية حول خطة مقترحة للحد من مبيعات البترول انتهى فيها (دون أن ينجح فى الإقناع) بأنها سوف تزيد الوضع تفاقما. وفى عصر المظاهرات المضادة للحرب، قام بتحليل صورة قيل إن المخابرات قد التقطتها بالطائرة لمظاهرة حول البيت الأبيض، أثبت فيه أن الصورة قد التقطت بعد نصف ساعة من انفضاضها.

وفى المعهد كان يورك يستمتع بالأبحاث غير التقليدية، وبلقاء العلماء من المجالات العلمية الأخرى. وفى عام ١٩٧٢ عثر أحد المشتغلين بالنظم الديناميكية على بحث لورنز الذى وضع عام ١٩٦٣ باسم "**التدفق اللادورى التحديدى** *Deterministic nonperiodic Flow*" فأعجب به لدرجة أنه قام بتوزيع نسخ منه على كافة معارفه من العلماء، ومنهم يورك.

كان عمل لورنز ساحرا، يبحث عنه يورك دون أن يعلم به. كبداية، كان بمثابة صدمة فى الرياضيات، نموذج هيولى يخرج عن تقسيم سمول الأول للتنظم. ولكنه لم يكن رياضيا صرفا، بل كان له مدلول فيزيائي، صورة لحركة الموائع، أدرك على التو أنه يود أن يراه الفيزيائيون. لقد وجه سمول الرياضيات إلى المسائل الفيزيائية، ولكن يورك كان يدرك أن لغة الرياضيات تقف عقبة فى التواصل بين الطرفين. آه لو كان العالم العلمى يضم غرفة تجمع تجمعا من الفيزيائيين والرياضيين، ولكنه لم يكن به شيء من ذلك. وحتى بعد أن بدأ سمول فى تقريب الفجوة، فقد ظلت للرياضيات لغتها وللفيزياء لغتها. الرياضيات تثبت النظريات عن طريق التحليل المنطقي، والفيزياء تثبتها عن طريق التجارب المعملية. حتى سبب وجود العلمين مختلف، والأمثلة التى تضرب فيهما مختلفة.

بلغ من إعجاب يورك بالبحث أنه أرسل منه نسخة إلى **سمول**، الذى استثاره بدرجة بالغة أن يجد لورنز قد اكتشف نظاما هيوليا كان يظن ألا وجود له، فقام بنشر نسخ منه بقدر استطاعته. ولما كان يورك قد وضع عنوانه الشخصى على البحث، فقد كان ذلك سبب الاعتقاد بأن يورك هو من اكتشف ذلك البحث.

شعر يورك أن الفيزيائيين قد تعلّموا ألا يروا الهيولية. إن الحساسيّة للظروف الأولية تقبع فى كل مكان. رجل يخرج من منزله متأخرا لثلاثين ثانية، فتسقط زهرية متجاوزة رأسه بعدة مليمترات، وبعد قليل يقتل تحت عجلات سيارة طائشة. أو لنجعل الأمر أقل مأساوية، فنتصور أنه قد فشل فى اللحاق بباص يمر كل عشر دقائق، مما تسبب أن يفوته قطار يمر كل ساعة. إن لاعب البيسبول يعلم أن الاختلاف الطفيف فى توجيه

الضربة لا ينتج عنه اختلاف طفيف في النتيجة. إن البيسبول لعبة تحكم بالبوصات، ولكن العلم ليس على هذه الشاكلة.

ومن الوجهة التعليمية، فإن قدرا كبيرا من الفيزيائيين والرياضيين يقضون وقتاً لا بأس به يكتبون معادلات تفاضلية ويعلمون طلابهم كيف يحلونها. والمعادلات التفاضلية تُعامل التغيّر في الزمن كمتصل، وليس كفترات مجزأة. ومن المعروف أن هذه المعادلات صعبة الحل، ولكن على مدى قرنين ونصف تعلم العلماء قدرا هائلاً من الأنواع القابلة للحل، مضمنة في المراجع والكتب التعليمية مع طرق حلها، حتى غاب عن الأذهان حقيقة علمية، هناك من هذه المعادلات ما هو غير قابل للحل. ويقول يورك: "إنك حين تستطيع إيجاد حل لمعادلة تفاضلية، فإنك على التو تستبعد حالة **الهيولية**". فالنظم القابلة للحل هي التي تحتويها المراجع العلمية، وهي منضبطة حسنة التصرف. فإذا ما واجه العلماء حالة من اللاخطية، فإنهم إما أن يُقربوها إلى الحالة الخطية، أو يبحثوا عن أساليب للالتفاف حولها. فالمراجع العلمية كانت تضم في الواقع ما يعتبر حالات خاصة من النظم، لا تتعامل مع الحساسية للظروف الأولية. كانت النظم اللاخطية، والتي تؤول إلى حالة الهيولية، نادرا ما يشار إليها في مجال التدريس. فإذا ما ووجهت مثل هذه الحالات، وبالطبع كثيرا ما كانت تواجه، فإن الدارسين تعلموا كيف يهملونها كنوع من التشويش. قليل هم من فهموا أن روح النظم الطبيعية تكمن في اللاخطية.

كان منهم يورك: "الرسالة الأولى هي أن اللانظام موجود. يريد الفيزيائيون والرياضيون أن يتعاملوا مع النظام، ولكن عليهم أن يفهموا اللانظام إذا ما أرادوا أن يتعلموا كيف يواجهونه. إن مهندس السيارات الذي لا يعرف كيف يتعامل مع الشاذ من الأمور كالرواسب الملتصقة بالصمامات لن يكون مهندسا كفئا" فالعلماء وغير العلماء على حد سواء، من وجهة نظر يورك، سوف يضللون أنفسهم إذا لم يطوّعوها على التعامل مع اللانظام. لماذا يرى الاقتصاديون أن هناك تغيرا دوريا في الأسعار؟ لأن الدورية هي أقصى ما يتصورون فهمه من تعقُّد، فإذا ما اختلت الأسعار بصورة شاذة، فإنهم يظلون يبحثون عن نوع من الدورية مشاب ببعض الشذوذ. وإذا ما واجه الفيزيائيون نفس الموقف مع نتائج تجاربهم، فإنهم يعزون ذلك إما لتداخل خارجي مع التجربة، أو لأخطاء كامنة فيها.

رأى يورك أن هناك رسالة في أعمال لورنز وسمول لا يستمع لها الفيزيائيون. ومن ثم فقد كتب بحثا في أوسع مجلة يمكن أن يخاطبها انتشارا؛ مجلة الرياضيات الأمريكية الشهرية *The American Mathematical Monthly*. (كعالم في الرياضيات كان من الصعب عليه التعامل مع مجالات خارج هذا التخصص، ولم يتعلم إلا بعد عدة

سنوات كيف يفعل ذلك). كان بحثه له قيمته فى حد ذاته، ولكن الشيء المثير فيه كان عنوانه الذى اختاره بنية توليد أكبر قدر من الإثارة: "**الدورة الثلاثية تعنى هيولية** ***Period Three Implies Chaos***". وقد نصحه بعض أصدقائه أن يختار عنوانا أكثر رصانة، ولكن يورك أصر على الكلمة التى تعبر عن مجال اللانظام المحكوم، كما تحدث فى نفس الوقت مع صديقه البيولوجى، **روبرت ماى** Robert May.

■ ■ ■

كان ماى قد دخل علم البيولوجيا من باب خلفي. لقد كان فى البداية فى موطنه الأصلى بسيدنى، استراليا، عالما فيزيقيا، وكان بحثه بعد الدكتوراه فى الرياضيات التطبيقية. وقد توجه لمعهد الدراسات المتقدمة فى برنستون للقيام بأبحاث لمدة عام، ولكن بدلا من أن يقوم بما جاء من أجله وجد نفسه منساقا للقاء البيولوجيين فى جامعة برنستون، التى قرر الالتحاق بها نهائيا، ووصل فيها إلى منصب عميد الدراسات.

وحتى هذه الفترة، كان البيولوجيون عازفين عن الخوض فى الرياضيات بما هو أبعد عن مبادئ التفاضل والتكامل، أما عاشقو الرياضيات ومن لهم بها تذوق فكانوا يتجهون بداية إلى الرياضيات أو الفيزياء. وكان ماى استثناء، كان اهتمامه فى البداية منصبّاً على مسائل التوازن والتعقد التجريدية، والتفسير الرياضى لكيفية التوازن بين المتنافسين. ولكنه بالتدريج بدأ ينساق إلى القضايا البيولوجية البسيطة، مثل مآل تعداد جنس معين على مدى الزمن. ولكن النظم المبسطة بينت أنها غير مجدية. وكان قد قضى وقتا فى دراسة معادلة **الفروق اللوجستية**، مستخدما أساليب التحليل الرياضى وآلة حاسبة بدائية.

كانت هذه المعادلة تشغل باله فى الواقع منذ كان فى موطنه الأصلي، لدرجة أنه كتبها على سبورة فى أحد ممرات الكلية التى عمل بها كتدريب لطلابه. كان السؤال الذى يلح عليه مرتبطا بمدى تأثير عنصر اللاخطية فى المعادلة، وقد وجد أن زيادة هذا العنصر لا يغير فقط فى القيم الكمية للنتائج، بل فى نوعيتها أيضا، بمعنى أنه لن يغير فقط فى المستوى الذى يصل عنده توازن التعداد، بل يحدد إن كان هذا التوازن سوف يحدث أصلاً.

لقد وجد أنه عندما يكون **معامل اللاخطية** صغيرا، فإن النظام سوف يستقر على حالة معينة، وحينما يكبر، فإن الحالة تنقسم إلى حالتين يتردد بينهما النظام، ولكن عند قيمة أكبر من ذلك، فإن النظام يتصرف بطريقة شاذة، لماذا؟ ما هى الحدود بالضبط

بين هذه الصور من التصرفات؟ لم يجد أجوبة شافية عن هذه التساؤلات (ولا طلبته بطبيعة الحال).

وضع ماى برنامجا مكثفا لدراسة رقمية لتصرفات هذه المعادلات البسيطة، تماثل ما قام به سمول. كان يحاول فهم هذه المعادلة البسيطة فهما شاملا، وليس مُجزّءا. كانت معادلته أبسط بمراحل من أى شيء قام سمول بدراسته، وكان من المتصور أن تكون إمكانيتها على خلق النظام وعدم النظام قد استهلكت منذ أمد، ولكنها لم تكن كذلك. لقد كان برنامج ماى فى الواقع مجرد بداية. لقد جرب مئات من قيم ذلك المُعامل، مُدخلاً عنصر التغذية الخلفية، لينظر ما إذا كانت الأرقام سوف تستقر عند نتيجةَ معينةَ، ومتى يكون ذلك. كان الأمر كما لو كان لديه بركته الخاصة للأسماك، يمكنه أن يتلاعب فى عملية تكاثرها وانقراضها. كان يغير من المعامل ببطء شديد، مثلا من ٢,٧ إلى ٢,٦٩٢، وعند تغيير طفيف فى المعامل، يتلاحظ تغييرا طفيفا فى التعداد، فيزحزح ماى الخط المعبر عن النتيجة بمقدار التغير الحادث.

وفجأة، عندما يتجاوز المعامل قيمة ٣، وجد ماى أن الخط قد انقسم إلى قسمين، فأسماكه التخيلية ترفض الاستقرار عند مستوى معين، بل تتأرجح بين قيمتين فى السنوات التالية. ومع قيمة أعلى قليلا، تتشعب الحالات إلى أربع، تعود كل حالة عند السنة الرابعة. مرة أخرى كان التصرف الدورى مستقرا، مرة عند سنة، ثم عند سنتين، ثم عند أربع.

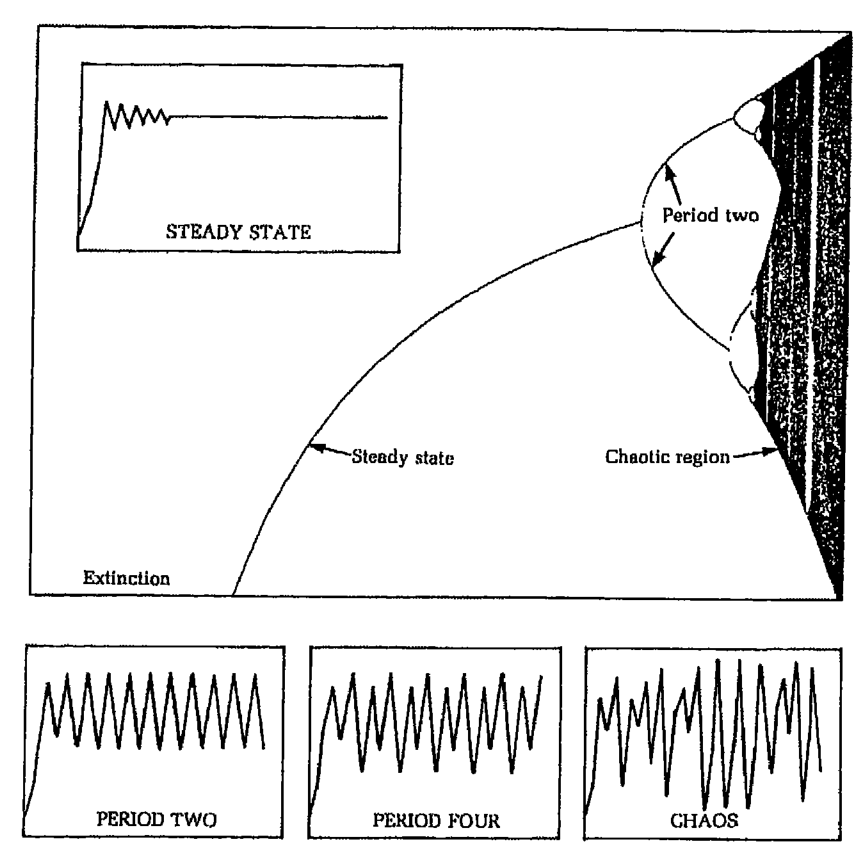
وكما فعل لورنز منذ عشر سنوات، أدرك ماى أنه يجب وضع نتائجه على شكل بياني. فقام بوضع قيم المعامل على الإحداثى الأفقي، ثم وضع قيمة التعداد الذى يكون عنده التوازن على الخط الرأسي. ورسم الشكل منحنى يرتفع ببطء، ثم عند تجاوز النقطة الحرجة الأولي، كان الخط ينقسم إلى خطين، ممثلا تعدادا له مستويان من التوازن عند دورة من مزدوجة بين عامين.

وتدريجيا بدأ هذا التشعب الثنائى يتزايد، عند قيم ٤، ٨، ١٦، ٣٢، ....، وفجأة، عند نقطة معينة، يختفى التشعب لتكون حالة الهيولية، التغيرات التى لا تعرف استقرارا. لقد اسودت المنطقة بأكملها نتيجة تكدُّس النِقاط. ولو كنت متتبعا تعداد النوع فى بيئة طبيعية، لظننت أنه لا يستقر أبدا بسبب تدُّخل بيئى خارجي.

ولكنه لاحظ أيضا أنه خلال هذا التعقد، تظهر فجأة حالة دورية جديدة، كنافذة فُتِحَت خلال ذلك الظلام، وبدورات شاذة، كأن تكون كل ثلاث سنوات أو سبعة، بعدها

يبدأ التشعب الثنائى بإيقاع أسرع، كأن يكون ٣، ٦، ١٢ أو ٧، ١٤، ٢٨.... إلى أن تظهر حالة **الهيولية** من جديد.

بداية، لم يكن ماى قادرا على رؤية هذه الصورة الشاملة، ولكن الأجزاء التى كان بإمكانه حسابها كانت مزعجة بما فيه الكفاية. فى الحياة الواقعية لا يلاحظ الإنسان إلا صورة واحدة، تماثل إحدى النقاط على المحور الرأسي، ربما تعداد مستقر، وربما دورة ثلاثية، وربما عشوائية تامة. ليس للمراقب أن يدرك أنه بتغيير فى قيمة معامل ما سوف يتصرف النظام بصورة مخالفة تماما.

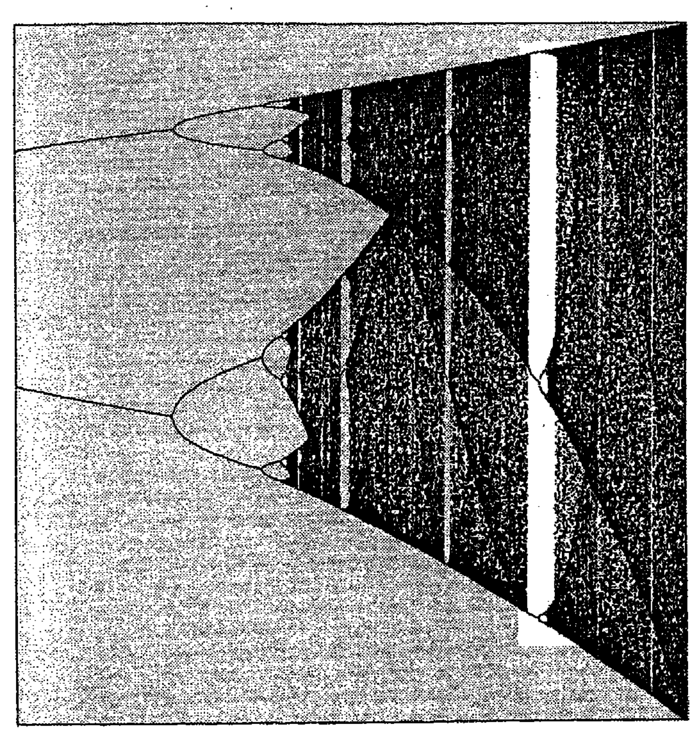


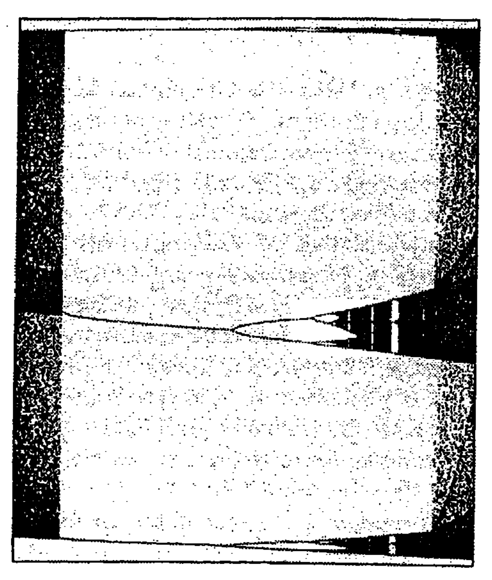
شكل ٣ - ٢ تضاعف الفترات والهيولية: بدلا من استخدام أشكال تُبيِّن تصرف التعداد عند درجات مختلفة من الخصوبة، استخدم روبرت ماى وغيره من العلماء "شكل التفرع الثنائي" لتجميع كافة البيانات على شكل بيانى واحد.

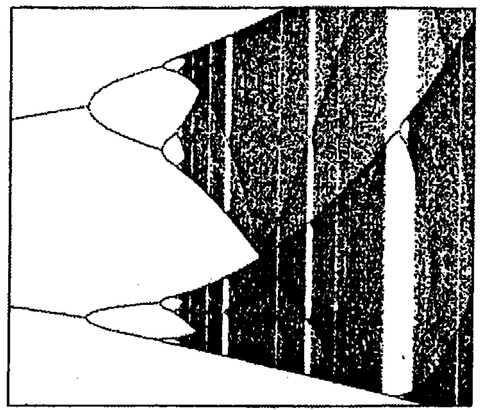
يُبيّن الشكل كيف يتسبب تغير فى المعامل «م» فى تغيير التصرف النهائى لنظام بسيط. تمثل قيم المتغير من اليسار لليمين، ويمثل التعداد النهائى على المحور الرأسي. وبمفهوم معين، يتسبب تزايد المعامل فى تحفيز النظام بدرجة أكبر، مما يترتب عليه زيادة اللاخطية.

حين يكون المعامل صغيرا (يسار)، ينقرض النوع. ومع ارتفاع المعامل، يميل التعداد للتوازن. ومع استمرار الارتفاع، يتذبذب التعداد بين مستويين، بالضبط كما تتسبب زيادة الحرارة فى عدم استقرار تيارات الحمل فى السائل. بعد ذلك تتوالى ظاهرة الانقسام، أو التفرع الثنائي، بدرجة أسرع ثم أسرع، إلى أن ينتهى النظام إلى الهيولية (يمين)، فيكون التعداد بقيمة مختلفة كل فترة تالية.

عالج جيمس يورك هذا التصرف باستفاضة فى بحثه المذكور آنفاً، وأثبت أنه فى أى نظام أحادى الأبعاد، لو ظهرت دورة ثلاثية، فإن النظام سوف يظهر دورات منتظمة فترات أخرى تالية، وأيضا دورات هيولية تماماً. كان لهذا الاكتشاف وقع الصاعقة، لتعارضه مع الحدس البديهي، والذى قد يوحى بأنه من السهل إقامة نظام يحوى دورية ثلاثية دون أن يحتوى على حالة الهيولية أبدا، وقد بيّن يورك استحالة ذلك.







شكل ٣ - ٣ نوافذ فى الحالة الهيولية: حتى مع أبسط المعادلات، بينت منطقة الهيولية فى شكل التفرع الثنائى أنها تتضمن مناطق كامنة من التنظيم، لم تكن تخطر على بال ماى فى البداية. بداية، يتسبب التفرع الثنائى فى دورات كالتالي: ٢، ٤، ٨، ١٦... بعد ذلك تبدأ حالة الهيولية، حيث لا نظام. بعد ذلك، حين يدفع النظام بدرجة أشد، تفتح نوافذ فى المنطقة بدورات فردية،٦، ١٢، ٢٤... يزداد الهيكل عمقا إلى مالا نهاية. حين تكبر منطقة ما، تراها تتشابه تماما مع الشكل الأصلى.

ورغم أهمية بحثه، فقد اعتبر يورك أن شهرته تجاوزت قيمته العلمية، وقد كان هذا صحيحا إلى حد ما. فبعد عدة سنوات، كان يحضر مؤتمرا ببرلين الشرقية، وعنّ له أن يقوم بجولة سياحية فى المدينة، خلالها لاحظ شخصا روسيا يريد أن يقول له شيئا ما. وبمساعدة صديق بولندى علم يورك أن الروسى يريد أن ينهى إليه أنه قد وصل إلى نفس النتيجة، واعداً أن يرسل له بحثه. وبعد أربعة أشهر وصل البحث بالفعل، ولكن يورك كان قد فعل ما هو أكثر من مجرد بحث رياضي، لقد أرسل رسالة للفيزيائيين عن الهيولية، إنها حالة مراوغة، مستقرة، ذات كيان محدد. أيضا فقد بيّن أن النظم المعقدة، والتى كانت تعالج تقليدياً عن طريق المعادلات التفاضلية متصلة الزمن، أصبح من الممكن فهمها عن طريق خرائط بسيطة مرسومة على فترات منتظمة.

وقد اتضح من تجربة الرحلة السياحية مدى الانفصال بين العلماء الغربيين والسوفيتيين، من جهة بسبب اللغة، ومن جهة أخرى بسبب القطيعة السياسية، الأمر الذى أدى إلى أن يكرر العلماء فى كل طرف أعمالا قام بها أقرانهم فى الطرف المقابل. لقد اتضح أن دراسات الهيولية ترجع فى الاتحاد السوفيتى إلى الخمسينات، والأهم من ذلك، لم تكن الفجوة بين الرياضيين والفيزيائيين موجودة لديهم.

وقد أثارت أعمال العلماء السوفيت كثيرا، وعلى الأخص نموذج الحدوة، والذى سرعان ما ترجمه أحدهم، وهو **ياشا سناى** Yasha Sinai إلى نظم ديناميكية حرارية. وحدث نفس الشيء لأبحاث لورنز حين قُدِّر لها أن تنتشر فى السبعينات. وفى الوقت الذى كان يورك وماى يناضلون فيه لكى يجمعوا بين الفيزيائيين والرياضيين، كان سيناى ورفاقه قد شكّلوا مجموعة عمل فى جوركي، وبعدها أصبحت من عادة بعض علماء الغرب الباحثين فى الهيولية أن يسافروا بانتظام للاتحاد السوفيتى.

فى الغرب كان يورك وماى أول من استقبلوا صدمة التضاعف فى الدورات، ومن نقلوها لرفاقهم. لقد تجاوز البيولوجيون **التشعب الثنائى** bifurcation خلال أبحاثهم بسبب افتقارهم إلى وسائل رياضية على الدرجة المناسبة من القوة، ومرّ الرياضيون على هذه الظاهرة مرور الكرام. ولكن ماي، والذى يقف بقدم فى كل من المعسكرين، علم أنه سوف يخوض مجالا مليئا بالإثارة والعظمة.

■ ■ ■

تطلب البحث بدرجة أعمق الاستعانة بإمكانيات الحاسوب، وكان لدى فرانك هوبنستد Frank Hoppensteadt حاسوب يفى بالغرض، قرر أن يستخدمه فى عرض سينيمائى.

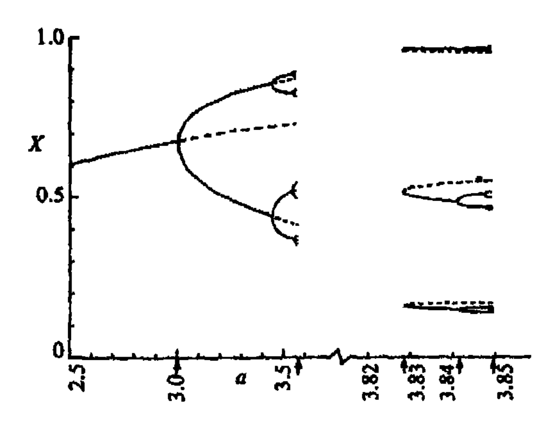
أدخل **هوبنستد**، عالم الرياضيات الذى وجد لديه شغفا بالبيولوجيا، المعادلة اللوجستية اللاخطية فى حاسوبه لتحسب مئات الملايين من المرات، مُخرجاً الآلاف من المخرَجات عند القيم المختلفة من المعامل اللاخطي. كان التشعب الثنائى يظهر، ثم الهيولية، تتخللها شعيرات من نظام لا يلبث حتى يتلاشى. وشعر هوبستيد أنه بفيلمه وكأنه يطير فى عالم غريب تماماً.

ورأى ماى فيلم هوبستد، كما قام بجمع بيانات مشابهة من مجالات علمية أخرى، علم الأجناس والاقتصاد وميكانيكا الموائع. وكمبشر بالهيولية، كانت له ميزتان على أقرانه من الرياضيين، فهو أولاً كان يعلم أن المعادلات البسيطة ليست واقعية، بل هى أشبه بالكنايات، وكان همّه أن يعلم إلى أى مدى تصدق الكنايات فى تصوير الواقع. وثانيا، أن اكتشافاته فى مجال الهيولية كانت تصب مباشرة فى قلب مجاله التخصصى، مثيرة الكثير من الخلافات.

وعلى أية حال، فإن الخلافات أمر شائع فى مجال التعداد البيولوجي. فقد كان الخلاف محتدما مثلا بين علماء البيولوجيا الجزيئية وعلماء البيئة. كان الأولون يعتقدون أنهم يمارسون العلم فى صورته الخالصة، بينما الآخرون يمارسون علماً مبهماً. بينما رأى علماء البيئة أن البيولوجيين الجزيئيين لا يفعلون سوى تكرار البحث فى مسائل قُتلت بحثا.

وفى داخل مجال **البيئة** ذاته، لاحظ ماى أن الخلاف محتدم حول طبيعة التغير فى تعداد الأفراد. ففريق يرى أنه يسير على نمط منضبط، عدا بعض الاستثناءات، بينما يرى الفريق الآخر العكس تماما، أن النمط فى أصله غير منضبط، مع وجود استثناءات. وليس مفاجأة أن ينسحب هذا الانقسام فى الرؤية على أسلوب التعامل الرياضى الصارم على المسائل البيولوجية الهلامية، فالفريق الأول يرى أنه لا بد من وجود آليات تضمن ذلك الانضباط، بينما يرى الفريق الثانى أنه لا بد من وجود عوامل تزيل احتمالات عدم الانضباط.

وفى خضم هذا الشقاق، جاءت الهيولية برسالة تدعو للدهشة، إن النماذج التحديدية البسيطة يمكن أن تولِّد ما يشبه التصرفات العشوائية، إلا أن هذه التصرفات لها فى الواقع هيكل متقن، على أن كل جزء منه يبدو متميزا تماما عن التشويش. لقد اقتحم هذا الاكتشاف خضم المعركة الخلافية.



شكل ٤ - ٣ ملامح شكل التفرع الثنائى كما رآه ماي، قبل أن تظهر حاسبات أقوى مدى ثرائه.

واستمر ماى فى النظر فى النظم البيولوجية من منظور الهيولية، واستمرت النتائج التى تعصف بالتصورات الحدسية فى الظهور. ففى قضية الأوبئة، من المعروف أنها تأتى فى موجات منتظمة أو غير منتظمة. وقد أدرك ماى أن التغيرات يمكن أن تولد عن طريق نموذج غير خطي، وتساءل عن إمكانية تأثير تدخل خارجى على مثل هذا النموذج، عن طريق برنامج للتطعيم ضد الوباء مثلاً. لقد رأى أنه حتى ولو كانت النتيجة النهائية فى صالح القضاء على الوباء، فإنه لا بد أن يعانى من اضطرابات مرحلية خلال الوصول لهذه النتيجة. فلو أن مسئولا عن حملة التطعيم قد لاحظ ارتفاعا فى مستوى الوباء خلال الحملة، فإنه على التو سوف يعتقد بفشلها.

وخلال عدة سنوات قليلة، أعطت أبحاث الهيولية دفعة للأبحاث البيولوجية، جامعة الفيزيائيين والبيولوجيين على بساط بحث مشترك، لم يكن متصورا لفترة قصيرة من قبل. وبحث **علماء البيئة والوبائيات** عن بيانات من الماضى كانت قد استبعدت على أساس عدم صلاحيتها للدراسة، واكتشفت ظواهر الهيولية لفترة تعود لقرنين من الماضي. وبدأ البيولوجيون الجزيئيون يرون **البروتين** كنظام متحرك، كما أخذ علماء وظائف الأعضاء ينظرون للأعضاء ليس على أساس هياكل صمَّاء، ولكن كنظم مهتزة اهتزازا معقّدا، تارة بصورة منتظمة وتارة غير ذلك.

كان ماى يدرك ما تثيره ظواهر التعقد فى النظم من خلافات علمية، وكيف أن كل مجال يعتبر حالة الهيولية فى نظمه حالة خاصة فى حد ذاتها. كان الموقف يثير اليأس،

ولكن، ماذا لو أن العشوائية الظاهرية أتت من نظم بسيطة؟ وماذا لو أن نفس النظام يمكن أن ينتج نفس صورة التعقد في مجالات علمية مختلفة؟ لقد أدرك ماى أن الهياكل المدهشة التى هو بالكاد قد بدأ يتكشفها ليست قاصرة بالضرورة على علم البيولوجيا، وتساءل عما إذا كان هناك علماء آخرون قد انتابتهم الدهشة فى مجالاتهم العلمية كما انتابته فى مجاله. ونشط على التو فى كتابة ورقة اعتبرها تبشيرية، نشرها فى مجلة "الطبيعة *Nature*" عام ١٩٧٦.

نادى ماى بأن العلم سوف يرتدى ثوبًا جديدًا لو أن الطلبة الشُبّان قد زُودوا بآلة حاسبة، وتعلموا كيف يجرون الحسابات مع المعادلة سالفة الذكر، إن مثل هذه الحسابات، والتى أوردها تفصيليا فى ورقته، سوف تواجه الإحساس بالفوضوية الذى يتولّد نتيجة التعليم التقليدي. إنها سوف تغير من نظرة الناس لكل شيء، من نظرية الدورات الاقتصادية إلى أسلوب انتشار الشائعات.

يجب أن تدرس الهيولية للطلاّب، ولقد آن الأوان لإدراك أن التعليم التقليدي، مهما بلغت أدواته من قوة، قد أعطى إحساسا خاطئا عن الظواهر الطبيعية.

---

[i] فى نموذج عالى التجريد كهذا، اعتبر التعداد بين الصفر والواحد الصحيح، الصفر يمثل حالة الانقراض التام، والواحد الصحيح يمثل أقصى عدد متصور من التعداد.

[ii] مشتقة من الكلمة اللاتينية logos بمعنى مسكن أو مقر، وقد وضع هذه المعادلة العالم Verhulst عام ١٨٤٥ كما تسمى أيضاً "معادلة الفروق التربيعية" لكون الرمز "س" يدخل فى المعادلة مرفوعا للقوة الثانية، انظر التحليل الرقمى لهذه المعادلة فى الفصل السادس، شكل ٦-١، المترجم.



هندسة للطبيعة

تولّدت فى ذهن **بنوا ماندلبروت** Benoit Mandelbrot صورة للطبيعة تشكّلت على مرّ السنوات، كانت عام ١٩٦٠ غامضة، مجرد صورة شبحية، ولكنه تعرف عليها حين رآها مجسدة أمام عينيه، على سبورة بمكتب **هندريك هوثاكر** Hendrik Houthaker.

كان ماندلبروت رياضيا متعدد المواهب، نشأ موهوبا بذهن علمى متوقّد، وترعرع فى مركز أبحاث شركة "الشركة العالمية للمهمات المكتبية "International Business Machines Corporation والمشهورة بالاسم ..I.B.M كان قد اتخذ من **الاقتصاد** مجالا له، يبحث فى توزيع الدخول الكبيرة والصغيرة فى بيئة اقتصادية ما. أما هوثاكر فقد كان عالم اقتصاد بجامعة هارفارد، وكان قد استدعى الرياضى الشاب لإلقاء كلمة. وذهل الأخير حينما رأى بعضا من اكتشافاته على سبورة أمام عينيه، فتساءل مازحا: "كيف يمكن لرسوماتى البيانية أن تسبقنى إلى المحاضرة؟".

لم يفهم هوثاكر السؤال، فما كان على السبورة لم تكن له أية علاقة بتوزيع الدخول، بل مجرد أسعار القطن على مدى ثمانية سنوات خلت.

وبالنسبة إلى هوثاكر أيضا، كان بتلك الرسومات شيء مُحيِّر. فالاقتصاديون ينظرون لأسعار السلع عموما على أنها تتراوح بين وضعين، عادى وشاذ. وعلى المدى الطويل، تدفع الأسعار للتغير عن طريق القوى الاقتصادية، أما على المدى القصير، فإنها قد تتراقص بصورة قد تكون عشوائية إلى حد ما. ولسوء الحظ، فإن بيانات أسعار القطن قد فشلت فى تحقيق هذا التوقع. كانت القفزات الكبيرة أكثر من اللازم. وقد وُجدت تغيرات بسيطة بطبيعة الحال، ولكن نسبتها إلى التغيرات الكبيرة لم تكن كبيرة بالقدر المتوقع. فمنحنى التوزيع لم يكن يسير كما يتوقع له.

إن النموذج القياسى لرسم التغيرات العشوائية كان ولا يزال هو **منحنى الجرس**، حيث تتركز أغلب البيانات حول منتصف الشكل، بمعنى أن أعلى قمته هى ما يقابل القيمة المتوسطة. وعلى جانبى هذه القيمة، يهبط المنحنى بسرعة إلى الصفر. ويستخدم رجال الإحصاء هذا المنحنى كما يستخدم الطبيب السماعة، أداة مبدئية للبحث. إنه

يمثل ما يسمى "**توزيع جاوس**" لتمثيل التصرفات التى لا تخضع لنظام ما فى الطبيعة. فالفكرة هى أن التغيرات العشوائية تكون مركَّزة حول قيمة متوسطة، وأن القيم التى تشذ عنها ترتب نفسها ببراعة فى شكل متماثل حول القيمة المتوسطة. ولكن تطبيق هذا المنحى على بياناته كان يوحى على الدوام بوجود شيء مفتقد.

لم يكن فى استطاعة هوثاكر أن يرتب أسعار القطن على هذه الصورة القياسية، كان الشكل الناجم هو نفسه الذى يثير فى نفس ماندلبروت الخيالات فى أماكن متعددة. على عكس أقرانه من الرياضيين، كان ماندلبروت يعالج قضاياه على أساس حدسه حول الأشكال والأنماط. كان لا يثق فى التحليل قدر ثقته فى الأشكال. وكان قد وصل بالفعل إلى أن هناك قوانين أخرى تحكم الظواهر العشوائية، تنتج أنماطا أخرى من التصرفات.

وعاد ماندلبروت إلى مكتبه محملا بصندوق معبأ ببيانات أسعار القطن التى رآها، ثم سارع على الفور بالاتصال بوزارة الزراعة فى واشنطون، طالبا الأسعار إلى عام ١٩٠٠.

وكغيرهم من العلماء فى المجالات الأخرى، كان علماء الاقتصاد يدركون أنهم على حافة الثورة الحاسوبية، حيث يتمكنون من معالجة البيانات بقدرة لم تكن متخيلة من قبل. على أن البيانات كانت لا تزال محتاجة للتطويع لإمكان استخدامها، فقد كان عصر الكروت المثقبة فى بدايته. كان الطريق لا يزال شاقا. والاقتصاديون، على شاكلة البيولوجيين، يتعاملون مع كائنات ذات إرادة، بل يتعاملون مع أكثر الكائنات غموضا.

ولكن مجال **الاقتصاد** يقدّم على الأقل كمّاً وافرا من البيانات. وقد مثلت أسعار القطن من وجهة نظر ماندلبروت معيّنا مثاليا للبيانات. كانت وافية، وكانت تعود فى القدم إلى بداية القرن. إن القطن من السلع ذات الأهمية الخاصة، ومن ثم كانت العناية بحفظ بياناته فى بورصته الأمريكية الرئيسية فى نيويورك، والتى كانت مرتبطة ببورصته فى ليفربول.

ورغم محدودية وسائل التحليل لدى الاقتصاديين حول تغير الأسعار، إلا أن ذلك لم يكن يعنى افتقارهم لتصور مبدئى عن ذلك. على العكس، كانت لديهم مفاهيم عن الموضوع يؤمنون بها تماما. من ذلك أن التغيرات الطارئة لا علاقة لها بالتغيرات طويلة الأمد، فالأولى تأتى عشوائية، فى حدود يوم أو اثنين، غير متوقعة، ومن ثم فهى أشبه **بالشوشرة** التى لا تثير اهتماما خاصا. أما التغيرات على المدى البعيد فشيء مخالف تماما. فتغير الأسعار على مدى أشهر أو سنوات أو عقود تكون بسبب قوى جسيمة،

كاتجاه لحرب أو حالة كساد، أسباب من الوجهة النظرية قابلة للفهم. لدينا إذن فى جانب أزيز من تغيرات عشوائية، وفى الجانب المقابل إشارات لتغيرات على مدى بعيد.

ولم يكن ذلك يوافق النظرة التى تكونت لدى ماندلبروت عن الطبيعة وتصرفاتها. فبدلا من عزل التغيرات الطارئة عن غيرها من طويلة الأمد، كانت صورته الذهنية تجمعهما معا. كان لا ينظر للأنماط بناء على مقياس معين، بل على مستوى كافة المقاييس. كان من الصعب تصور كيف يمكن أن ينتج صورته، ولكنه كان مقتنعا بوجود تماثل، ليس بين اليمين واليسار، وليس بين الأعلى والأدنى، ولكن بين الصغير والكبير من المقاييس.

والذى حدث أنه حين أجرى ماندلبروت البيانات على حاسوب أى بى إم، حصل بالفعل على النتائج التى كان يبحث عنها. إن القيم التى تمثل الشذوذ من وجهة نظر التوزيع القياسي، تنتج تماثلاً من وجهة نظر المقاييس. كل تغير فى السعر كان عشوائيا وغير متوقع، ولكن التغير كان يسير فى خط ثابت على كافة المقاييس؛ فالتغيرات اليومية تتماثل تماما مع التغيرات الشهرية. الشيء الذى لا يكاد يصدق أن درجة التغير طبقا لتحليل ماندلبرو قد ظلت ثابتة على مدى ستين عاما، واجهت خلالها حربين عالميتين تخللتهما حالة كساد عالمى.

وسط هذا الركام من البيانات المتفرقة كان يكمن نوع من النظام. وأمام هذا الموقف تساءل ماندلبروت عن مغزاه وعن سببه، وكيف جمع بين أسعار القطن وتوزيع الدخول.

والحقيقة أن معلومات ماندلبروت فى الاقتصاد كانت غير كافية للتفاهم مع الاقتصاديين. وحين قام بنشر بحثه، قدم له أحد طلابه بمقدمة تربط بين البحث واللغة الاقتصادية. ثم اتجه ماندلبروت إلى اهتمامات أخرى، ولكنه كان عاقد العزم على متابعة الكشف عن ظاهرة **المقياسية** scaling، كانت تبدو ظاهرة ذات قيمة فى حد ذاتها- إنها بصمة.

■ ■ ■

فى تقدمة له لمحاضرة بعد عدة سنوات، قدم على أنه: (".... قام بتدريس الاقتصاد فى جامعة هارفارد، والهندسة فى جامعة ييل، والفسيولوجيا فى كلية الطب بمدرسة آينشتاين...."). وكان يعقب بفخر على مثل هذه التقدمات: "أحيانا ينتابنى شعور حين أسمع تاريخى العلمى بأننى لم أوجد قط، إن نقاط الالتقاء بين هذه المجالات منعدمة تماما". حقا لقد فشل ماندلبروت منذ أيامه الأولى فى آى بى إم أن يظل على قائمة

مجال علمى لمدة طويلة. كان دائما زائرا من الخارج، يأخذ أساليب غير تقليدية إلى زاوية غير مطروقة من الرياضيات، مستكشفا مجالا علميا نادرا ما كان يرحب فيه به، مخبئا آراءه العظمى حتى يتمكن من نشر أبحاثه، متعيشا فقط على ثقة رؤسائه بشركة آى بى إم. لقد قام بغزوة فى مجال الاقتصاد، ثم تركه مخلفا وراءه آراء مثيرة، ولكنها لا تصلح بحال أن تكون عملا متكاملا.

فى قصة الهيولية، شق ماندلبروت لنفسه طريقا خاصا. إن صورة الطبيعة فى ذهنه قد تطورت منذ أن لاحت غامضة له فى الستينات حتى صارت شكلا من الهندسة على أعلى قدر من الرسوخ. بالنسبة للباحثين فى الهيولية السائرين على درب لورنز وسميل ويورك وماي، كان عالم الرياضيات هذا يلعب مشهدا جانبيا، ولكن أسلوبه ولغته أضحت بعد حين جزءا لا يتجزأ من العلم الجديد.

سيبدو وصف ماندلبروت غريبا على من لم يعرفه إلا فى سنوات مجده، وما حصله من ألقاب وجوائز، ولكنه فى الواقع لا يمكن فهمه على حقيقته إلا من خلال نشأته الأولى، أو بالأحرى بصفته كلاجئ. لقد ولد عام ١٩٢٤ فى وارسو لعائلة يهودية من لتوانيا، نزحت بسبب القلاقل السياسية إلى باريس عام ١٩٣٦، حيث كان يقيم عم له، وهو الرياضى زولم ماندلبروت Szolem Mandebrot. وبقيام الحرب كان على العائلة أن تواجه خطر النازى مرة أخرى، فلحقت بالفلول الهاربة إلى أن وصلت مدينة تول Tulle.

وظل بنوا ردحا من الزمن كمتدرب حرفي، شاذا عن المألوف فى أمرين؛ طوله غير العادي، وخلفيته التعليمية الفقيرة. كانت فترة مليئة بالمصاعب والمخاوف، ولكنه لم يكن يحمل من ذكرياتها شيئا من ذلك، بل كان يحمل ما حققه فيها من صداقات، وما أحيط به من رعاية، خاصة من مدرسيه، ومنهم شخصيات ذات وزن، اكتووا هم أنفسهم بنير الحرب. على وجه العموم، كان تعليمه متقطعا وغير نمطي. لم يكن يدعى أبدا أنه يعرف الحروف الأبجدية، أو جدول الضرب فيما يجاوز الصفوف الخمسة الأول، ولكن كانت لديه موهبة.

بعد تحرير باريس، تمكن بنوا من اجتياز امتحان التقدم لمدرسة الإيكول نورمال ثم الإيكول بوليتكنيك، رغم ضعف استعداده التقليدى. لقد تضمنت امتحانات القبول اختبارا فى الرسم، وهو ما اكتشف ماندلبروت فى نفسه قدرة كامنة فيه. أما فى مادة الرياضيات، فقد مكّنته قدرته على تمثل الأشكال من حل المسائل المعروضة، معادلاً بها ضعف تدريبه على الحلول النمطية. لقد اكتشف فى نفسه قدرة على النظر لأى مسألة تحتاج إلى تحليل على أنها نمط من الأشكال يتصوره فى ذهنه. وإذا ما أعطى شكلا

ما، فإنه يكون قادراً دائماً على معالجته بالتحويل وتغيير التماثل لجعله أكثر تناسقا. وفى الغالب كانت معالجته تقود على الفور إلى حل للمسألة التحليلية المقابلة. وعلى ذلك فقد حصل فى الكيمياء والفيزياء، حيث لا مجال لاستغلال قدرته على تطبيق الأشكال الهندسية، على درجات منخفضة.

وتُعتبر المدرستان اللتان التحق بهما من المدارس الراقية التى لا نظير لهما فى الولايات المتحدة. وكانت الإيكول نورمال هى الأكثر رقيا، بدأ بالالتحاق بها، ولكنه تركها بعد عدة أيام ليلتحق بالأخرى، لقد كتب عليه أن يكون لاجئا للمرة الثانية، هذه المرة من سيطرة عالم رياضيات ذى أسلوب خاص فى دراسة الرياضيات، يدعى **بورباكى** Bourbaki.

ربما لم يكن بورباكى ليحقق ما حققه من نجاح فى بلد خلاف فرنسا، حيث الخضوع التام للتقاليد العلمية واحترام الثقاة من العلماء الأكاديميين. فهو قد وضع مدرسة فى مجال الرياضيات تتميز بالصرامة المطلقة فى جعل هذا العلم علما خالصا منغلقا على ذاته، وفى التمسك بمناهج البحث التقليدية، ولا يعترف بالأمور التطبيقية بأية حال، كما كان يحارب التصور البيانى للمسائل الرياضية، معتبرا أن قدرة الرياضى تتمثل فى التحليل الذهني. واشتهرت هذه المدرسة التى أُرجع أساسها إلى العالم الفرنسى الشهير بوانكريه، وطغى هذا الفكر على مناهج التفكير الرياضى لمدة طويلة. على أنه فى القرن العشرين بدأ طلاب الرياضيات يواجهون أنفسهم بالخيار بين المعيشة فى هذا البرج العاجي، أو النزول إلى العالم الواقعى وجعل الرياضيات أداة لخدمته.

وكان تأثير منهج بورباكى طاغيا فى فرنسا، وأكثر طغياناً على الإيكول نورمال، الأمر الذى استدعى ماندلبروت إلى ترك المدرسة فراراً بما ميزه الله به من مواهب.على أن الضربة القاصمة لمدرسة بورباكى جاءت حين تحطّمت صرامة منهجه التجريدية بظهور الحاسوب، والذى خلّفها أثرا من آثار الماضي، ولكن الوقت كان متأخرا بالنسبة لماندلبروت، حيث اضطر للمرة الثانية، وبعد عشر سنوات إلى الفرار من فرنسا بأسرها لنفس السبب، هذه المرة إلى الولايات المتحدة.

■ ■ ■

كتب ماندلبروت ذات يوم: "سوف تكون كارثة على العلم، (وأيضا على الألعاب الرياضة) إذا كان للتنافس المقام الأول فوق كل شىء، وإذا تمثل هذا التنافس فى الانسحاب إلى مجالات ضيقة من التخصص. إن أولئك العلماء الجوّالين بطبيعتهم بين

فروع العلم يلعبون دورا هاما فى إثراء الحياة العلمية". وينطبق عليه هذا الوصف أصدق انطباق، خاصة حين أصبح يتمتع بالحماية التى أسبغتها عليه أى بى إم عندما ضمّته إلى مركز أبحاثها. وعلى مدى ثلاثين عاما من النكران إلى الشهرة، لم ير عملاً له يرحب به فى المجال الذى قصد أن يوجّهه له. حتى الرياضيون، ودون قصد خبيث، كانوا يرددون أنه مهما كانت طبيعة ما يفعله ماندلبروت، فهو ليس واحدا منهم.

لقد وجد طريقه ببطء، فى الغالب محرّضا بمعرفته الواسعة بخبايا التاريخ العلمى المجهولة. لقد دخل فى مجال رياضيات اللغة، مبينا قواعد توزيع الكلمات بها (يقول إن الفكرة واتته وهو يقرأ كتابا التقطه عرضا من سلة مهملات بإحدى محطات المترو لكى يقطع به الوقت). وأجرى أبحاثا فى نظرية الألعاب، وشق طريقه فى الاقتصاد، وكتب فى قواعد تخطيط المدن كبيرها وصغيرها. وقد ظل الخط العام الذى يوجه تفكيره فى كل هذه الموضوعات غامضا.

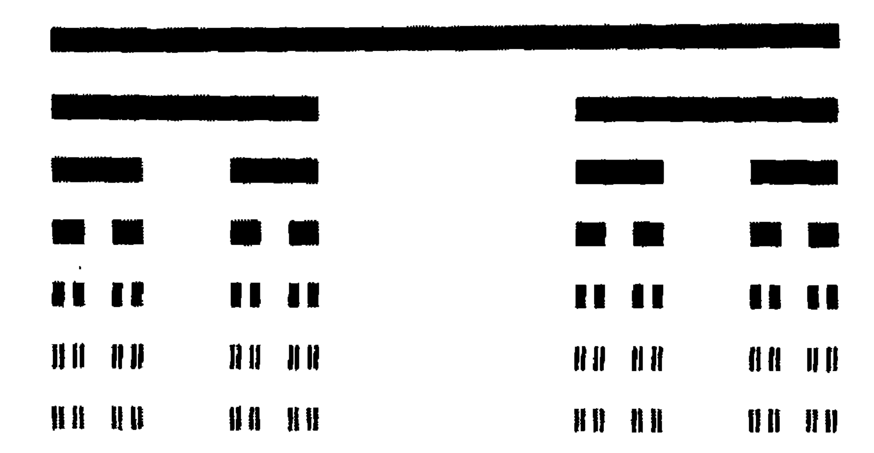
فى بداية عمله بشركة أى بى إم، وبعد قليل من أبحاثه فى توزيع الدخول، عرض عليه رئيسه مشكلة تهم العمل بالشركة، متعلقة **بالتشويش** الذى يتداخل فى خطوط **الاتصالات** التى تربط بين الحاسبات. إن البيانات تُنقل عبر هذه الخطوط على صورة نبضات كهربية، ويعلم المهندسون أنه كلما زادت النبضة قوة، أمكن التغلب على ذلك التشويش. ولكن نوعا من التشويش اللحظى كان عصيا على التخلص منه، إذ كان يبرز بصورة فجائية ليدمر الإشارات المنقولة.

على الرغم من أن طبيعة هذا التشويش كانت عشوائية، فقد كان الملاحظ أنه يأتى فى تجمّعات، حيث توجد فترات خالية منه، تتلوها فترات مشوبة به. وحين تحدث ماندلبروت مع المهندسين، علم حقيقة عن تلك التشويشات. لم تكن تذكر بصفة رسمية، حيث لا توجد لغة رسمية للتعبير عنها، وهى أنه كلما نُظر إليها بدقة أكثر، زاد مظهرها تعقدا. وقدم ماندلبروت طريقة لتصوير توزيعها، تتوقع بالضبط النمط الذى تبدو عليه، والذى كان متميزا بخاصية غريبة، أن التوزيع لا يتم حول قيمة متوسطة، فمن المستحيل حساب قيمة متوسطة للشوشرات كل يوم، أو كل ساعة، أو كل ثانية.

وقام أسلوبه فى الوصف على أساس التغلغل أكثر وأكثر فى الفصل بين فترات التشويش وفترات الخلو منه. لنفرض أننا قسمنا الإرسال إلى ساعات، ساعة خالية من التشويش، وساعة مشوبة به. ثم افرض أننا قسمنا الساعة المشوبة إلى فترات أقل، كل فترة عشرون دقيقة. ستجد فى الحالتين أن كل فترة إرسال تتمثل فى فترات نظيفة تماما، وفترات مشوبة، تأتى فيها التشويشات على صورة انفجارية، وكل انفجار

تشويشي، مهما كانت ضآلة فترته، تتخلله فترات من الاتصال النظيف تماما. الأكثر من ذلك، لقد وجد علاقة هندسية ثابتة بين الصفة التفجّرية للتشويش، والمسافات بين الفترات النظيفة، فالنسبة بين الفترات النظيفة والفترات المشوبة ثابتة على مستوى الساعة، أو على مستوى الثانية.

لم يكن لدى المهندسين إطار علمي يفهمون به وصف ماندلبروت، على عكس الرياضيين. لقد كان يصف في الواقع هيكلا تجريديا يسمى "**فئة كانتور** Cantor set"، وهى فئة وضعها العالم الرياضى **جورج كانتور** George Cantor فى القرن التاسع عشر. ولكى تأخذ صورة عن هذه الفئة، خذ خطا مستقيما، ثم أزل من منتصفه بمقدار ثلثه، فتحصل على خطين مستقيمين متساويين. أزل من كل خط ثلثه من المنتصف، تحصل على أربعة مستقيمات، وهكذا إلى آخر مدى يمكنك من الاستمرار. ما الذى تحصل عليه فى النهاية، كمٌ من "الغبار" موزع بطريقة معينة، هى التى تصورها ماندلبروت فى توزيع التشويش على خطوط الاتصالات.



شكل ١-٤ غبار كانتور: ابدأ بخط مستقيم، أزل من منتصفه ما يساوى ثلث طوله. أزل من كل قطعة مستقيمة متبقية ثلث طولها من المنتصف، وافعل ذلك مع كافة الأجزاء المتبقية، وهكذا. فئة كانتور هى الغبار المتبقى من تكرار العملية، عددها لانهائي، ولكن الطول الكلى صفر.

مثل هذه الخصائص المتناقضة أزعجت رياضيى القرن التاسع عشر، ولكن ماندلبروت وجد فى فئة كانتور نموذجا لحدوث الأخطاء فى قنوات الاتصالات. يواجه

المهندسون فترات خالية من الشوشرة، ثم فترات من ظهور مفاجئ لها. كما أن التحليل الدقيق يبين أن فترات الشوشرة فى حد ذاتها تحتوى على فترات خالية منها. وهكذا، فقد كانت مثالا لزمن فراكتلي، فعلى أية مقياس، سواء أكانت الفترة ساعة أو دقيقة أو ثانية، وجد ماندلبروت أن نسبة الفترات الخالية من الشوشرة إلى المشوبة بها ثابتة. وقد رأى أن هذا الغبار لا غنى عنه فى نمذجة **التقطع intermittency**.

لقد غيّر ماندلبروت فى فهم المهندسين لسبب هذا النوع من التشويش، فقد كانوا يتصورونه نتيجة تداخل خارجى، ولكن نمط ماندلبروت المقياسى بيّن لهم أنه لا يمكن تفسيره على أساس حوادث محلية. وكان لهذا الفهم أثر على أسلوب التخلص من هذا النوع من التشويش، فبدلا من محاولة الارتفاع بمستوى الإشارات لجعل التشويش أقل، عليهم أن يتقبلوه كواقع لا يقبل الإزالة، وأن ينتهجوا آليات أخرى للحد من أثره".

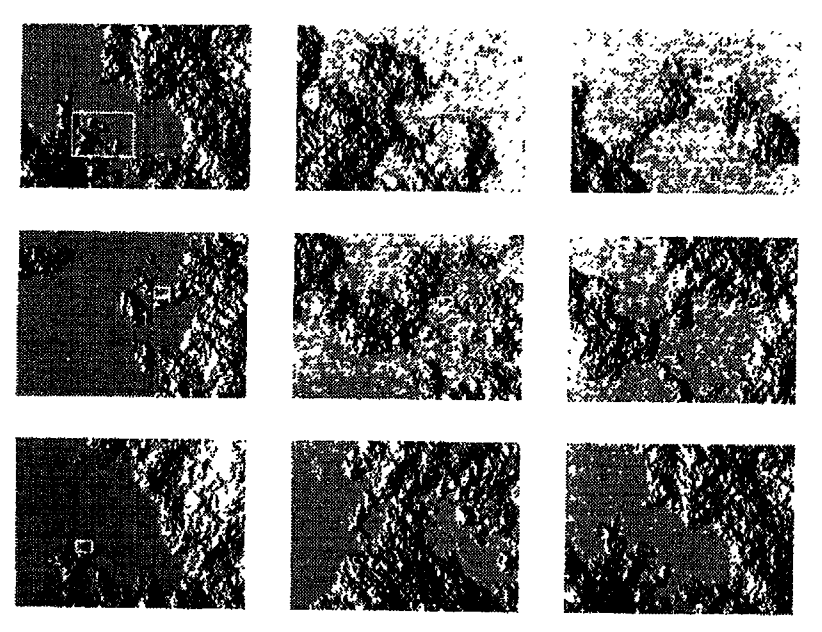
التقطع[١]، التشويش الفجائي، غبار كانتور، كلها ظواهر ليس للهندسة التقليدية بأشكالها الهندسية من خطوط ودوائر ومخروطات، والتى دامت لعشرين قرنا، أن تستوعبها. إنها تمثل تجريدا غاية فى التبسيط للطبيعة، وتوجد فلسفة أفلاطونية (مثالية) حول تماثل أشكالها. ولكن فى مجال فهم الظواهر المعقدة من الطبيعة، يعتبر هذا التجريد غير مُجدٍ بالمرة.

ويحلو لماندلبروت أن يقول إن السحب ليست أشكالا كروية، والصواعق لا تسير فى خطوط مستقيمة. إن الهندسة الجديدة تحاكى الطبيعة فى خشونتها وعدم استوائها أو دقة حوافها. إنها هندسة الأشياء المتراكمة، والمكومة، والمجعدة، والملتوية، والملتفة. لقد انتظر فهم تعقد الطبيعة ظهور من يشك فى أن هذا التعقد ليس مجرد عشوائية عارضة، ويؤمن بأن المثير فى الصاعقة ليس اتجاهها، ولكن المسار المتعرج لها. لقد قدم ماندلبروت ادعاءً عن العالم، مضمونه أن أشكاله الغريبة ذات مغزى، وليست مجرد تشويهات للأشكال المنتظمة للهندسة الإقليدية. إنها فى الغالب مفاتيح لمضامين الأشياء.

ما هو مضمون **شاطئ بحرى** مثلا؟ قدم ماندلبروت هذا السؤال فى ورقة كانت بمثابة نقطة تحول فى تفكيره. كان عنوانها "ما هو طول شاطئ إنجلترا؟"

التقى ماندلبروت بهذا السؤال فى بحث لعالم إنجليزى يدعى **لويس ريتشاردسون** Lewis Richardsosn، قد خاض فى عدة موضوعات أصبحت فيما بعد جزءا من علم **الهيولية**. فهو قد كتب عام ١٩٢٠ فى التنبؤ الجوي، وفى دوامات المياه، وفى سرعات الرياح. أما بالنسبة لموضوع الشواطئ، فقد وجد اختلافات فى التقدير قد تصل إلى عشرين بالمائة.

وقد صدم السؤال الذى وجهه ماندلبروت الموجه إليهم إما لكونه غاية فى البساطة أو غاية فى السخف. كان الرد إما: "لست أدري، ليس هذا مجال تخصصي"، أو "لست أدري، وسأرجع للموسوعات". ولكنه فى الواقع كان يقصد أن الإجابة، من منظور معين، هى مالا نهاية[iii]. بمعنى آخر، تعتمد الإجابة على أداة القياس، فكلما صغرت كان الرقم أكبر، ولكنها سوف تظل تقريبية. تصور أن المسّاح قد استخدم فرجار التقسيم، وفتحه على مسافة ياردة واحدة، واستخدمه فى القياس، فإن الإجابة ستكون لأقرب ياردة. ثم قام بتصغير الفتحة لقدم واحد، ستكون الإجابة لأقرب قدم، وسوف تكون التفاصيل بالبديهة أكثر. ثم قام بتصغير الفتحة، وليكن لأربعة بوصات، هنا ستكون التفاصيل أكثر، والرقم أقرب. إن هذه التجربة الخيالية يقصد بها تغير الأشكال بحسب المقاييس التى ينظر إليها بها. فالناظر للساحل من قمر صناعى سوف يعطى تخمينا أقل من السائر على قدميه يعبر كل صخرة وكل خليج، والسائر بدوره سوف يعطى تخمينا أقل من دودة تسير على الشاطئ، تعبر كل حصاة عليه.



شكل ٤-٢ شاطئ فراكتلي: شاطئ منتج حاسوبيا؛ التفاصيل عشوائية، ولكن **البعد الكسرى** ثابت، مما يؤدى إلى أن تكون درجة الخشونة أو عدم الانتظام كما هى مهما بلغت درجة التكبير.

وتقودنا البديهة إلى القول بأنه مهما بلغت درجات التقريب دقة، فإنها لا بد منتهية إلى رقم ثابت، هو الطول الحقيقى للشاطئ. فالأرقام، بمعنى آخر، يجب أن تتقارب. والواقع لو أن الشاطئ كان أحد أشكال إقليدس المثالية، كدائرة مثلا، فإن الإغراق فى الدقة سيؤدى بالفعل إلى تقارب الأرقام إلى القيمة المضبوطة. ولكن ماندلبروت فى حالة الشاطئ قد وجد أن الأرقام تستمر فى الكبر، ربما لا تنتهى إلا عند دقة تصل إلى حجم الذرة.

■ ■ ■

حيث إن قياسات إقليدس؛ الطول والعمق والسمك والقطر، قد فشلت فى قياس الأشكال غير المنتظمة، فقد لجأ ماندلبروت إلى أسلوب آخر، أسلوب الأبعاد dimensions. والأبعاد فكرة أكثر ثراء للعلميين منها لغيرهم. فنحن نعيش فى كون ثلاثى الأبعاد، بمعنى أنه لتحديد نقطة فى الفراغ نحتاج إلى ثلاثة أرقام، الموقع على خط الطول وعلى خط العرض، ثم الارتفاع عن سطح الأرض. وينظر لهذه الأبعاد على أنها متعامدة على بعضها البعض. ونحن فى ذلك ما زلنا فى نطاق الهندسة الإقليدية، فالفراغ له ثلاثة أبعاد، والأسطح لها بعدان، والخط المستقيم له بعد واحد، والنقطة لا أبعاد لها. ويستفاد من ذلك فى رسم الخرائط مثلا، فالبيان المطلوب من خريطة يتحدد برقمين، حتى لو كانت على سطح مطوى، كخرائط الكرة الأرضية مثلا.

والآن، ما هى أبعاد كرة من خيط التريكو؟ يقول ماندلبروت، إن هذا يعتمد على البعد الذى ننظر إليها منه. فمن بعد كبير، تبدو كنقطة لا أبعاد لها، وعلى بعد أقرب، تبدو ككرة ذات ثلاثة أبعاد، أما على القرب الشديد، فيكفى بعد واحد، فهى أصلا مكونة من خيط ذى بعد واحد، وإن كان قد طوى عدة مرات..

فإذا سايرنا هذا المنطق، ونظرنا على المستوى الميكروسكوبي، فالخيط اسطوانة ذات ثلاثة أبعاد، يتكون من فتائل يمكن اعتبارها ذات بعد واحد، إلا عند مستوى أكبر من التكبير.

وعلى ذلك فإن أبعاد الشيء تكون شيئا آخر غير الأبعاد الثلاثية المألوفة، لكن نقطة الضعف فى جدل ماندلبروت تكمن فى عدم الدقة فى التحديد، واعتماده على عبارات مثل "بعد كبير"، "أكثر قربا"، فماذا عن الوضع بين الوضعين؟ بالتأكيد لا توجد حدود قاطعة بين مراحل التغير فى عدد الأبعاد على الصورة التى تم شرحها. على أن هذا الأمر، والذى هو أبعد من أن يكون نقطة ضعف، بقدر ما هو غموض الطبيعة ذاتها، قد قاد ماندلبروت إلى فكرة جديدة حول موضوع الأبعاد.

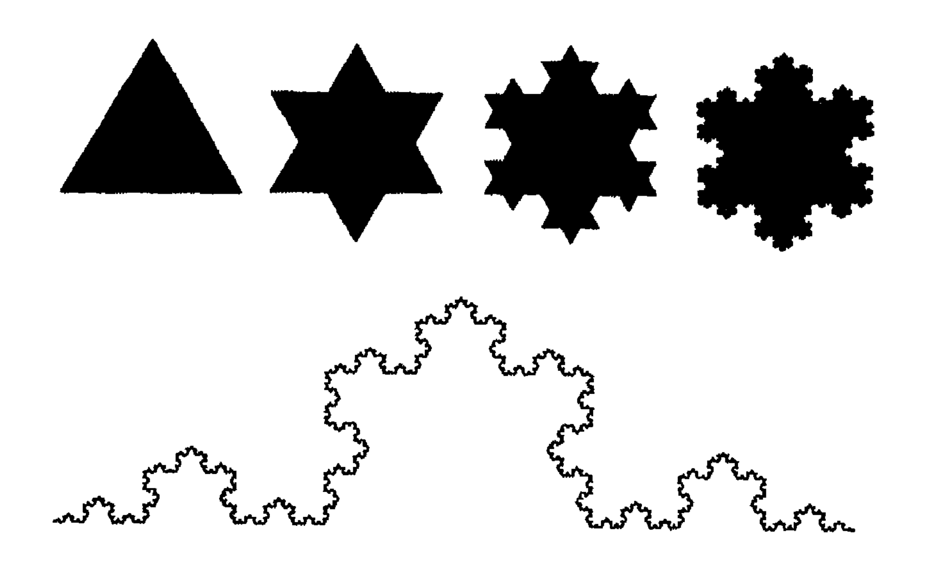
خرج ماندلبروت عن الأرقام الصحيحة فى تحديد الأبعاد، ليفترض أرقاما كسرية، وهى فكرة تثير استحالتها الذعر فى قلوب غير الرياضيين، ولكنها أثبتت أنها ذات فائدة قصوى.

إن **الأبعاد الكسرية** قد أعطت وسيلة لقياس خصائص كانت تفتقد لتعريفات واضحة، درجة عدم الاستواء أو التكسر أو عدم الانضباط لشكل ما. إن الشاطئ المتعرج، بصرف النظر عن قضية قياس الطول، له خصيصة ثابتة تعبّر عن عدم الاستواء. وقد وضع ماندلبروت طرقا لحساب الأبعاد الكسرية للأشكال الواقعية، وأساليب لإنشاء الأشكال بمعرفة أبعادها الكسرية، مع بيان بأن هذه الخصيصة تظل ثابتة مع تغير المقاييس. وقد اتضح بالفعل صحة الادعاء، فمهما بلغت درجة التكبير أو التصغير تظل هذه الخصيصة، درجة عدم الاستواء، ثابتة، وهكذا لا تفتأ الطبيعة تبدى صوراً من الانتظام داخل اللانظام.

وفى عصر يوم من شتاء عام ١٩٧٥، وهو بصدد وضع كتاب شامل عن أفكاره تلك، وجد ماندلبروت أنه بحاجة إلى اسم لأشكاله، ولأبعاده، ولهندسته، وباستشارة قاموس لاتيني، وقع بصره على كلمة fractus، مشتقة من الفعل frangere المقابل للفعل to break فى الإنجليزية، ومصدر لكلمات مثل fracture بمعنى كسر بالمعنى الطبى، وfraction بمعنى كسر رياضى. الكلمة بدت مناسبة تماماً لأن يشتق منها الاسم المطلوب، فراكتل fractals[iv]، [والتى سوف نطلق عليها "**فراكتل**، الجمع: فراكتلات"].

■ ■ ■

إن أشكال الفراكتلات فى الواقع هى وسيلة لرؤية اللانهاية. تصوَّر مثلثا متساوى الأضلاع، طول ضلعه قدم واحدة. تصور تحولا بخطوات واضحة محددة على النحو التالي: أن تنشئ على كل ضلع عند منتصفه تماما مثلثا بثلث طوله، فيكون فى الخطوة الأولى بطول ثلث قدم،، بحيث تحصل فيها على ما يشبه نجمة داود السداسية. عامل كل مثلث من المثلثات الثلاثة بنفس الطريقة، وتخيل أنك مستمر فى هذه العملية إلى القدر الذى تستطيعه. سوف يقترب الشكل بالتدريج من تشكيلة الكسف (بكسر الكاف، وفتح السين أو تسكينها، وهى الشرائح الرقيقة) الثلجية حين تتكون فى الطبيعة. يسمى الشكل الناتج "منحنى كوخ "Koch curveنسبة إلى عالم الرياضيات السويدى هالج فون كوخ Halge von Koch الذى وصفه عام ١٩٠٤.

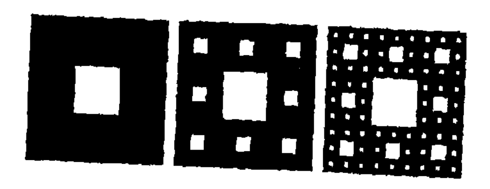


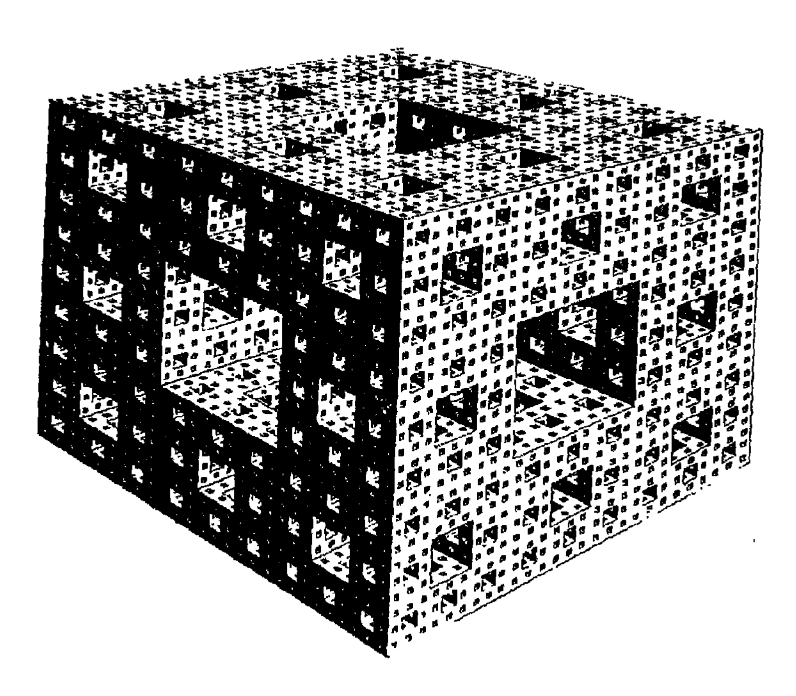
شكل ٣-٤ الكسفة الثلجية لكوخ: "نموذج تقريبي ولكن قوى للشاطئ"، كما عبر عنه ماندلبروت. لكى ترسم منحنى كوخ، ارسم مثلثا متساوى الأضلاع. عند منتصف كل ضلع، ارسم مثلثا متساوى الأضلاع بطول ضلع ثلث المثلث الأصلى. كرر العملية مع كل المثلثات الناشئة، وهكذا. إن طول الضلع للشكل هو ٣ × ٤/٣ × ٤/٣× ٤/٣.. إلى مالا نهاية، ولكن المساحة الكلية تكون على الدوام أقل من مساحة الدائرة المحيطة بالمثلث الأصلي. وهكذا فإن خطا لانهائى الطول يضم فى مساحة متناهية القيمة.

اكتشاف جديد! أصبح من الواضح أن **منحنى كوخ** له خصائص مثيرة. فهو أولا منحنى متصل، لا يتقاطع مع نفسه أبدا، لأن المثلثات المضافة تقل فى الحجم على الدوام، وثانيا، كل مثلث يضيف مساحة جديدة للشكل، ولكن الشكل يظل محدود المساحة، حيث إنك لو رسمت دائرة حول المثلث الأصلي، فستجد أن الشكل لا يتجاوزها بأية حال من الأحوال.

ولكن المنحنى لانهائى فى الطول، فكل خطوة فى التحويل تزيد من طول المنحنى بنسبة واحد وثلث. هذه النتيجة الملغزة، منحنى لانهائى الطول محصور فى مساحة محدودة، بلبلت الرياضيين الذين عرفوا بهذا المنحنى. إنه منحى فظيع، يعصف بلا هوادة بالبديهيات الحدسية.

واتجه بعض الرياضيين إلى التفكير فى مثل هذه الأشكال الفظيعة، ذات خصائص مستمدة من منحنى كوخ. من ذلك **بساط سيربنسكى** Sierpinski carpet. لتنفيذ هذا البساط، خذ مربعا، قسمه ثلاثا فى ثلاث، لتحصل على تسعة مربعات، أزل الذى فى المنتصف، وقم بنفس الخطوة على الثمانية الباقية، واستمر فى ذلك.





شكل ٤-٤ إنشاء تراكيب بواسطة الثقوب: قليل من الرياضيين فى أوائل القرن العشرين من تصوراً أشكالا فظيعة تصنع من عدد لانهائى من الحذف والإضافة. أحد

هذه الأشكال هو سجادة سيربنسكى Sierpinski carpet، تصنع عن طريق حذف تُسع مربع من وسطُ المربع الأصلى (فوق)، ثم التسع من منتصف كل مربع متبق، وهكذا. المقابل الفراغى لذلك هو **إسفنجة منجر** Menger sponge الذى يحتوى على مساحة سطح لانهائية، ولكن حجم يساوى الصفر.

لا يمكن للذهن أن يتصور التعقد الذى يحصل من التكرار إلى مالا نهاية، ولكن بالنسبة لشخص له موهبة تصور الأشكال الهندسية، هذا التكرار للهياكل على مدى أدق وأدق، يمكن أن يفتح له عالما بأسره. وقد استمتع ماندلبروت بهذه الأشكال استمتاعا طفوليا، متصورا تغيرات لم يتصورها أو يفهمها أحد من قبل. كان لا يفتأ يضع لها الأسماء؛ الخيوط، الصفائح، الإسفنجيات، الزبد، الحشايا.

وبدا أن الأبعاد **الكسرية** هى الأداة المناسبة تماما. بمعنى معين، اتضح أن درجة اللانظام تعتمد على كفاءة الجسم فى شغل الفراغ. فالخط الهندسى لانهائى الطول، ولا يشغل شيئا من الفراغ بالمرة، وهو ذو بعد واحد. ولكن منحنى كوخ، والذى هو أيضا لانهائى الطول، يشغل حيزا من الفراغ، لكونه يحيط بمساحة محدودة. إنه إذن أكثر أبعادا من المستقيم، ولكنه لا يصل لدرجة السطح الهندسى ذى البعدين. وبأسلوب قديم رياضى عفى(*) عليه الزمن استطاع ماندلبروت أن يحسب أبعاد هذا المنحنى، والذى ينتج من ضرب محيط المثلث الأصلى فى واحد وثلث إلى مالا نهاية، فوجده بالضبط ١,٢٦١٨.

وفى استمراره فى هذا الطريق، كان لماندلبروت ميزتان على أقرانه الذين فكروا مثله فى هذه الأشكال. الأولى هى إتاحة استغلال قدرة الحاسوب. لقد كان الرياضيون بدونه قد وصلوا بقدرتهم الحسابية إلى نفس موقف البيولوجيين قبل اختراع المجهر. إن ماندلبروت يريد أن يجرى تحويلات ذات قواعد بسيطة آلاف بل ملايين المرات. وحين استغل الحاسوب فى ذلك، استخرج نتائج لم تكن متوقعة بالمرة.

الميزة الثانية هى الصورة التى كونها عن الطبيعة منذ تحليل أسعار القطن، وتشويش خطوط الاتصالات، والتى بدأت تتبلور الآن. إن دراسته للأنماط غير المنتظمة للعمليات الطبيعية واستكشافاته للأشكال المعقدة إلى اللانهاية قد تقابلا فى نقطة، ألا وهى "**التماثل الذاتى** self similarity". أصبح مصطلح fractal يقابل التماثل الذاتى.

والتماثل الذاتى يقصد به التماثل على مختلف المقاييس. إنه يعنى أنماطا داخل أنماط.وهو يعنى ضمنياً "**المعاودة** recursion". خرائط أسعار القطن وخرائط الأنهار قد بينت تماثلاً ذاتيا، ليس فقط لأنها بينت تفاصيل أدق وأدق، بل لأنها أنتجت أيضا

تفاصيل بقياسات ثابتة. إن الأشكال المخيفة مثل منحنى كوخ تُبدى تماثلا ذاتيا لأنها تُظهر نفس الشكل مهما كانت درجة التكبير[7]. إن التماثل الذاتى مبنى فى صميم أسلوب إنتاج المنحنيات، نفس التحويل يُطبَّق مرات ومرات على مقياس أصغر وأصغر. والتماثل الذاتي، والمعاودة المتضمنة بها، خصيصة سهلة التمييز، كما أن صورها موجودة فى كافة أنحاء الفكر. شخص واقف بين مرآتين متوازيتين، فتنعكس صورته على هذه المرآة، ثم على تلك، وهكذا إلى مالا نهاية، وكذلك فى الصورة الكاريكاتيرية لسمكة تأكل سمكة، وهكذا.

■ ■ ■

فى الجانب الشمالى الغربى من الولايات المتحدة، يُعتبر أفضل مكان لدراسة الزلازل هو مرصد لامونت-دورتى الجيوفيزيقى بولاية نيويورك، غرب نهر هادسون. فى هذا المرصد بدأ **كرستوفر شولتز** Christopher Scholtz – بجامعة كولومبيا والمتخصص فى طبيعة الأرض– فى التفكير فى أشكال ماندلبروت.

فى الوقت الذى كان فيه الرياضيون والفيزيائيون يتجاهلون هذا النوع من الهندسة، كان شولتز البراجماتى النزعة على استعداد لتقبلها. كان أول لقاء بماندلبروت فى الستينات، حينما كان الأخير يعمل بالاقتصاد والأول حديث التخرج منكب على دراسة سؤال عويص متعلق بالزلازل. كان من المعروف لعشرين سنة خلت أن **الزلازل**، كبيرها وصغيرها، تتبع نمطا رياضيا خاصا فى توزيعها، يماثل النمط الذى قال به ماندلبروت عن توزيع الدخول فى اقتصاد السوق الحرة. كان نمط الزلازل ملحوظا فى كل مكان تقاس فيه الزلازل على الكرة الأرضية. وكان من المثير إمكانية معرفة أية عملية فيزيائية تؤدى لهذا الانتظام، على الأقل بالنسبة لشولتز، حيث كان غيره من المشتغلين بهذا العلم يكتفون بتسجيل الظاهرة، ثم يمرون عليها مر الكرام.

وفى عام ١٩٧٦ وقع فى يد شولتز كتاب لماندلبروت، مُدعَّم بالصور التوضيحية والمعادلات الرياضية، معُنون باسم *"Fractals: Forms, Chance and Dimensions"*. وكأن المؤلف قد جمع فى كتابه هذا كل ما يعرفه أو يظن أنه يعرفه عن الكون. فى غضون سنوات قليلة كان هذا الكتاب، وبديله الأكثر تنقيحا واتساعا: *"The Fractal Geometry of Nature"* قد حققا أعلى مبيعات لكتب فى الرياضيات العليا.

كشأن قلة من العلماء فى مجالات أخرى، من الذين شغلوا أنفسهم بالجانب المادى من الطبيعة، قضى شولتز عدة سنوات يحاول أن يتصور ما الذى يفعله بذلك الكتاب.

كان لديه غرام بالسطوح، وكان الكتاب ممتلئا بها. ووجد نفسه لا يستطيع أن يكف نفسه عن التفكير فيما تثيره أفكار ماندلبروت، ومن ثم بدأ يستخدم أشكاله فى وصف وتصنيف وقياس أجزاء عالمه العلمى.

وسرعان ما اكتشف أنه لم يكن وحيدا، رغم أن مؤتمرات وندوات أشكال ماندلبروت لم تر النور إلا بعد ذلك بعدة سنوات. فأفكار هندسة ماندلبروت وحّدت بين العلماء الذين كانوا يظنون أن ملاحظاتهم كانت شيئا خاصا بهم فقط، وكانوا لا يجدون وسيلة لوصفها. لقد ساعدت هذه الهندسة العلماء فى فهم كيفية انصهار الأشياء معا، وتبعثرها عن بعضها البعض، وتهشمها. إنها وسيلة للنظر إلى المواد، الأسطح المجعدة مجهريا للمعادن، والثقوب الدقيقة للصخور المسامية الحاملة للبترول، والطبيعة المهشمة لمنطقة زلازل.

وكما رأى شولتز الأمر، فإنه موكول لعالم **الجيوفيزياء** وصف سطح الأرض، ذلك السطح الذى يشكّل شاطئا عند التقائه بالمحيط. وفى خلال السطح العلوى الصلب للأرض تكمن أسطح من نوع آخر، أسطح ممتلئة بالشقوق. فالتصدّعات والكسور تهيمن على هيكل سطح الأرض لدرجة أنها أصبحت المفتاح لوصفه وصفا جيداً، كما أنها تتحكم فى سريان الموائع فى باطن الأرض، الماء والبترول والغاز الطبيعى. كما تتحكم أيضا فى تصرّفات الزلازل. إن فهم الأسطح كان فى غاية الأهمية، ومع ذلك فقد كان شولتز يعلم أن مجاله العلمى فى مأزق، حيث لا يوجد إطار علمى لذلك.

فالجيوفيزيائيون ينظرون للأسطح نظرة أى فرد آخر، شكل من الأشكال، قد يكون مسطّحاً، وقد يكون على أى شكل آخر. بإمكانك مثلاً أن تنظر إلى الملامح العامة سيارة من طراز الفولكس فاجن المعروفة باسم "الضفدعة"، ثم ترسم سطحها كمنحنى يمكن قياسه على أسس الهندسة الإقليدية، وأن تضع معادلة تصفه. من وجهة نظر شولتز تكون قد نظرت للسطح من منظور خاص، كما لو كنت تنظر للكون من خلال مرشح لونى أحمر، فلا ترى إلا ما هو متفق مع هذا اللون، وتحرم من ثراء الطيف اللونى الكامل. والطيف فى هذا التشبيه يقابل المقاييس من تصغير أو تكبير. فنظرتك لجسم سيارة الفولكس فاجن كمنحنيات إقليدية تعبر عن نظرة مراقب على بعد عشرة أمتار مثلا، أو مائة متر، فماذا عن مراقب على بعد كيلومتر، أو مائة كيلومتر؟ وماذا عن بعد سنتيمتر، أو ملليمتر، أو ميكرون؟

تصوّر مراقبا ينظر للأرض من ارتفاع مائة كيلومتر فى الفضاء، فعلى هذا المقياس لن تكون السيارة إلا مجرد انبعاج من الانبعاجات التى يراها تغطى سطح الأرض، مجرد لمحة من لمحات العشوائية.

وبتقريب النظر أكثر وأكثر من خلال تلسكوب مثلا، نجد أن السطح يبدأ فى التشكّل، سلساً ناعم الملمس أولا، ثم تبدأ التعرّجات والانبعاجات تظهر على السطح، فى عشوائية ظاهرة، إنها تبدو هيولية.

ووجد شولتز أن هندسة ماندلبروت تعطى أداة قوية لوصف انبعاجات سطح الأرض، كما وجد **علماء المعادن** (الميتاليرجي) نفس الشيء لوصف أسطح الأنواع المختلفة من الحديد. فقد وجد مثلا أن البعد الكسرى لسطح المعدن يعطى فكرة عن مدى متانته. كما يعطى بالنسبة للأرض فكرة عن خصائص هامة أيضا. فكر شولتز فى منحدر جبل. على البعد يرى مسطحا إقليديا ذا بعدين، وحين يقترب منه الباحث، فإنه يجد نفسه سائراً فيه أكثر من سائر فوقه، فقد تحلل إلى كتل صخرية قد تصل الكتلة إلى حجم سيارة، وأن **البعد الفعلى** قد أصبح ٢,٧، حيث أصبحت الأسطح الصخرية تحيط بالمكان لتشغل تقريبا الفراغ ثلاثى الأبعاد، مثل كتلة من الإسفنج.

كما وجد الوصف من خلال أشكال ماندلبروت تطبيقات مباشرة فى مجموعة من المسائل المرتبطة **باتصال الأسطح** بعضها ببعض، كاتصال أسياخ الحديد بالخرسانة، أو الاتصال بين الأجزاء الميكانيكية، أو بين الأجسام الموصِّلة للكهربية. لمثل هذه الاتصالات بين الأسطح خصائص تعتمد على نوع المواد المتلاصقة، بل اتضح أنها تعتمد على الأبعاد الكسرية للانبعاجات التى تكون على سطحى التلاصق. ومن أقوى النتائج التى تمخضت عن تطبيق هندسة ماندلبروت على الأسطح المتصلة أنها لا تتلاصق فى أى مكان على الإطلاق. إن انبعاجات الأسطح تمنع ذلك، وعلى أى مقياس. الصخور التى تكون تحت ضغط شديد للغاية، تضن على مقياس غاية فى الصغر محتوية على فراغات تسمح بتدفق الموائع.

وأصبح شولتز معروفا بين أقرانه بأنه من القلائل الذين يتعاملون مع هندسة ماندلبروت، وكان يعلم أن البعض منهم ينظر إليه كشخص غريب الأطوار، وأنه حين يذكر شيئا عن أشكال ماندلبروت فهو إما أن يثير الإعجاب لحداثة علمه، أو يؤخذ على أنه إنسان نشاز. وحتى كتابته للأبحاث كانت تمثل لديه مشكلة، هل يكتب للقلة التى تفهم هذه الهندسة الحديثة، أم للكثرة الذين لا يفهمونها. أما هو فقد كان مقتنعا تماما بأن هندسة ماندلبروت لا غنى عنها.

"إنها نموذج وحيد يمكّننا من التعامل مع مدى تغيرات الأبعاد على الأرض. إنها تعطيك أدوات رياضية وهندسية للوصف وللتنبؤ. فما أن تتعرف على المسألة، وتعلم

نمط التفكير، حتى تجد نفسك قد بدأت فى فهم الأشياء وإجراء القياسات بطريقة جديدة تماما. لقد تولدت لديك رؤية جديدة، أوسع وأرحب"

■ ■ ■

كم حجم هذا؟ كم عمر ذاك؟ سؤالان يدور حولهما العلم فى أغلب أنشطته، وهما من الأسئلة الأولية فى طريقة نظر الناس للعالم لدرجة تخفى عنهم أنهما يحملان شيئا من التحيّز. فهم يعتقدون أن الحجم والمدة، وهما كميّتان تعتمدان على المقياس بطبيعتهما، يمكن بهما وصف الأشياء وتصنيفها. فحينما يصف بيولوجى الجسم البشري، أو فيزيائى الكوارك١٠، فإن السؤال عن مقدار الحجم أو المدة يكون سؤالا مناسبا. فالكائنات مقيدة بمقياس معين، يكون هو المتحكم فى طبيعة هيكله. تخيل لو أن الإنسان بلغ فى حجمه ضعف ما هو عليه الآن، عندئذ سوف ينهار هيكله العظمى تحت ضغط وزنه. إن المقياس هنا مهم.

على أن فيزياء الزلازل لا تعتمد على المقياس، فالزلازل الكبيرة هى بالضبط صورة مكبرة من الزلازل البسيطة. وهذا يميز الزلازل عن الكائنات مثلا، فكائن ذو عشر بوصات حجما يختلف فى هيكله تماماً عن آخر ذى بوصة واحدة، وهذا بدوره يختلف جذريا عن آخر ذى مائتى بوصة، كل يحتاج إلى طبيعة هيكل مختلفة تماما عن الآخر. أما **السحب**، على الجانب الآخر، فظاهرة **مقياسية**scaling phenomena تماما كالزلازل. فعدم انتظامها، معبَّر عنه بالبعد الكسري، لا يتغير بالمرة حين يتغير مقياس النظر إليها. لهذا السبب يصعب على المسافرين بالطائرة تصوُر بُعد السحاب عنهم، إلا إذا ساعدهم على ذلك عوامل أخرى كقلة الكثافة. وقد بينت تحليلات صور الأقمار الصناعية فى الواقع **بعدا كسريا** لا يتغير فى السحب التى صُورِّت على بعد مئات الأميال

ومن الصعب الخروج على عادة السؤال عن طبيعة الأشياء عن طريق الحجم والمدة. ولكن مبدأ هندسة ماندلبروت هى الآتي: بعض عناصر الطبيعة يكون النظر إليها من خلال مقياس معين نوعا من التضليل. خذ العواصف مثلا، إنها تعرف عن طريق تعريفات لحجمها، ولكنها تعريفات فرضها الإنسان على الطبيعة، ففى الواقع، يعرف كل علماء الطبيعة الجوية أن اضطراب الهواء ذو مقياس متصل، من زوبعة صغيرة تثار فى ركن فى مدينة إلى دوامة عنيفة يمكن أن تراقب من الفضاء. إن التصنيف يعتبر فكرة خاطئة. فطرفا المقياس المتصل من نفس طبيعة منتصفه.

وقد ظهر أن بعض معادلات تدفق الموائع لا علاقة لها بالحجم فى كثير من المواقف، بمعنى أنها تُطبَّق دون النظر إلى المقياس. فجناح طيارة مُصَغَّر ورفاص سفينة مُصغر يمكن أن يُختبَرا فى النفق الهوائى وفى حوض السفن، وأيضا، مع استثناءات بسيطة، العواصف الكبيرة تشبه الصغيرة.

والأوعية الدموية، من الأورطى إلى الشعيرات، تصنع أيضا مُتَّصلا[vii]. فهى تتشعب وتنقسم ثم تتشعب وتنقسم، إلى أن تصبح من الصِّغر بحيث تضطر خلايا الدم أن تسير فيها فى صف واحد. إن طبيعة تشعبها تخضع لهندسة ماندلبروت، وهيكلها يماثل بعضا من الأشكال الفظيعة التى فكَّر فيها. فقد دعت الضرورة إلى أن تقوم الأوعية الدموية بعملية سحر فى نطاق الأبعاد. بالضبط كما قام منحنى كوخ بتكديس خط لانهائى الطول فى مساحة محدودة، على النظام الدورى أن يكدِّس مساحة هائلة فى حيز محدود. فمن وجهة نظر المصادر المتاحة، يعتبر الدم شيئا غاليا، والمساحة قضية حاسمة. لقد بلغ من كفاءة استغلال هندسة مندلبروت أنه فى أغلب الأنسجة لا تبعد خلية واحدة عن النسيج بأكثر من حجم ثلاث أو أربع خلايا. على أن الدم والأوعية تشغل حيزا محدودا للغاية، ليس أكثر من خُمس الحجم من الجسم البشرى.

هذا التشكيل الفائق الدقة، شجرتان ملتفتا الأغصان من الأوردة والشرايين، ليس استثناءً بأية حال من الأحوال. فالجسم البشرى مليء بهذه التعقيدات. فى الجهاز الهضمي، تُبدى الأنسجة تجاعيد تضم تجاعيد. والرئة أيضا، تريد أن تضم أكبر مساحة ممكنة فى أضيق فراغ ممكن. فمقدرة الكائن على الاستفادة من الهواء تتناسب مع سطح رئتيه. وزيادة فى تعقيد الموقف، يجب على متاهة الشعيبات الهوائية أن تختلط بكل كفاءة مع الأوردة والشرايين.

يعلم كل طالب طب أن الرئتين مصممتان لتضما مساحة ضخمة. ولكن علماء التشريح متعودون على النظر إلى مقياس محدد فى كل مرة على حدة. مثلا، إلى ملايين الأكياس الهوائية التى تنتهى بها الشعيبات الهوائية. وتخفى لغة علم التشريح الوحدة على مستوى المقاييس. بينما أسلوب أشكال ماندلبروت-على النقيض- يستوعب الهيكل بأكمله بمعرفة التشعبات التى يعملها، تشعب يتصرف بطريقة ثابتة مهما اختلفت المقاييس، من أكبرها إلى أصغرها. ويصنف البيولوجيون الأوعية على أساس من أحجامها، وهو تصنيف قد يكون مجديا فى مواضع معينة، ولكنه لا يمنع من أن تثور مشكلة الحدود بين تصنيف وآخر، مما يفتح بابا للبلبلة.

ليس عندما نشر ماندلبروت آراءه عن الفسيولوجيا، ولكن بعد ذلك بعقد من الزمان، بدأ بعض البيولوجيين يتفهمون التنظيم الذى يحكم هياكل الجسم البشرى برمته مُوصّفا بلغة هندسة ماندلبروت، وقد اتضح مدى ملاءمتها لمجالهم العلمي. فالنظام الذى يجمع البول اتضح أنه من نفس طبيعة تلك الهندسة، وكذلك قناة المرارة فى الكبد، وشبكة الألياف التى تنقل النبضات الكهربية للعضلات. وبالنسبة لأبحاث القلب، فقد ظهر فرع مثير للغاية، إذ اتضح أن التوقيت بين نبضات عضلات النصف الأيمن والنصف الأيسر من القلب لها تأثير خطير على سلامة القلب. ورأى المتشبعون بفكر الهيولية أن هذا التوقيت، مثله فى ذلك مثل الزلازل والدورات الاقتصادية، يتبع قوانين هندسة ماندلبروت.

كيف أمكن للطبيعة أن تصمم مثل هذا التعقد؟ يرى ماندلبروت أن التعقد يكمن فقط فى الفكر الإقليدي. أما طبقا لمفاهيم هندسته، فالتشعب يتبع قوانين بسيطة، يكفى لشرحها كَمٌ ضئيل من البيانات. ربما كان "الدنا "D.N.A يختزن قواعد تحويل بسيطة كتلك التى مرّت بنا فى منحنى كوخ وسيربنسكي، بدلا من أن نتصوره قد اختزن كافة معلومات التشعبات الهائلة فى الجسم، وهو تصور غير محتمل.

"بدأت أبحث فى مخلفات تاريخ العلم عن هذه الظاهرة، لأننى كنت موقنا بأن ما ألاحظه ليس استثناء، بل لعله واسع الانتشار. لقد حضرت العديد من المحاضرات، وقرأت الدوريات غير المألوفة، وكثيرا ما كنت أخرج بلا طائل. ولكن فى النهاية كسبت الرهان."

بعد أن شحن ماندلبروت كتابه بكل ما جمعه من أفكار طوال حياته عن الطبيعة وتاريخ الرياضيات، تبوأ مركزا أكاديميا مرموقا. كان محط أنظار هواة حضور المحاضرات، بمجموعاته من الشرائح الشفافة وشعره الأبيض المتهدل. بدأ فى جمع الجوائز وألقاب الشرف، وأصبح معروفا للمجتمع غير العلمى كما هو فى المجتمع العلمي. من جهة بسبب الجمال الذى كان يميز أشكاله، ومن جهة أخرى لأن الآلاف من حائزى الحواسب الشخصية بدءوا يستكشفون عالمه بأنفسهم، ومن جهة ثالثة بسبب عادته فى تقدّم الصفوف. لقد وضع أحد الباحثين فى جامعة هارفارد قائمة بمن يمكن أن يوصفوا بأنهم مُفجِّرو ثورات فى تاريخ العلم، فحصرهم فى ستة عشر، منهم ماندلبروت.

على أنه بالنسبة لمتخصصى الرياضة البحتة، يعتبر ماندلبروت شخصا خارجيا، يصارع بكل قواه فى حلبة السياسة العلمية. وفى أوج قمته، كان موضع لمز من بعض

زملائه، بمقولة أنه مختال بما حققه من شهرة، وأنه قد طغى على حقوقهم فى التقييم. ليس من شك فى أنه فى فترة انشقاقه العلمى قد اكتسب مهارة فى التكتيك كمهارته فى العمل على تحقيق النجاح العلمي. كان حين يرى مقالا يتضمن بعض الأفكار عن أشكاله، يسارع بالاتصال بالكاتب متذمرا بأنه لم يشر إلى كتابه كمرجع له.

وكان المعجبون به يرون أن غروره أمر مغتفَر، على اعتبار ما واجهه حتى حقق الاعتراف به. بل لقد رأى البعض أنه لولا هذه الصفة لما تمكن من المواصلة فى الصراع. مثل هذا الجدل أمر وارد فى تاريخ العلم، وقد كان لمندلبروت منه نصيب وافر. إن المطّلِع على كتابه يرى كيف يتحدث كثيرا عن نفسه: "أنا أرى... أنا أعتقد..... لقد تصورت.... لقد بينت..... لقد صغت مصطلحا....".

مثل هذا الأسلوب مستهجن لدى الكثيرين، الذين لم يشفع له لديهم أنه قد أشار للكثيرين من قبله كمراجع له (كلهم، كما لاحظ حاسدوه، ليسوا على قيد الحياة). لقد اتهموه بأنه يريد أن يحتل من العلم مكانة البابا، يقف فى عليائه لينشر بركاته ذات اليمين وذات الشمال على فروع العلم المختلفة. لقد قاوموه، وإذا كان من المستحيل أن يكفّوا عن استخدام أشكاله وفكرة الأبعاد الكسرية التى ابتدعها، فإنهم كانوا يتحاشون ذكر اسمه بقدر الإمكان، أو ينسبون بعض أفكاره لأشخاص آخرين كلما كان ذلك متاحا. لقد بغضوا فيه-خاصة الرياضيين-دخوله بعض مجالات العلم بأفكاره، ثم خروجه منها تاركا عبء إثباتها لأناس آخرين.

إنه سؤال وجيه. إذا نادى أحد بأن فكرة ما يحتمل أن تكون صحيحة، وبرهن آخر ذلك بأدلة قاطعة، فلمن ينسب الفضل فى التقدم العلمي؟ هل مجرد التكهن يعتبر إنجازا علميا؟ واجه الرياضيون هذا السؤال كثيرا، ولكنه قد أصبح على درجة أكبر من الأهمية حين بدأ الحاسوب يلعب دوره. أولئك الذين استخدموه لإجراء التجارب أصبحوا أقرب لعلماء الاختبارات، مما مكنهم من الوصول لاكتشافات دون اتباع الطريق التقليدى فى الرياضيات، المبنى على البرهنة المنطقية.

كان كتاب ماندلبروت واسع المدى، محشّوا بتفاصيل عن تاريخ الرياضيات. وفى أى طريق تؤدى إليه الهيولية، كان يدّعى أنه أول من طرقه. لم يكن من المهم أن يجد أغلب القراء مراجعه غامضة، أو حتى غير مجدية. عليهم أن يعترفوا بقدرته الخارقة فى استلهام اتجاه التطور لمجالات لم يدرسها على الإطلاق، من علم الزلازل إلى الفسيولوجيا. كانت أجزاء منه تخلو من الإمتاع، أو حتى مثيرة للأعصاب.

ليس هذا بالأمر الجلل، فلم يقل أحد إن كل عبقرى عليه أن يلبس وجه آينشتاين المتواضع. على أنه كان على ماندلبروت أن يجيد التحايل لسنوات طويلة لإمكان عرض أفكاره. كان عليه أن يصوغها بصورة لا تثير النفور منها، وأن يشطب مقدمته التى توحى بالقدرة على التصور، حتى يضمن لها أن تُنشر. وحين نشر كتابه أول مرة باللغة الفرنسية، اضطُر إلى أن يدّعى أنه ليس به شيء مثير. كان يمارس الألعاب السياسية فى مضمار العلم.

"كانت السياسة تتطلب استخدام أسلوب أسفتُ على استخدامه فيما بعد. كان علىَّ أن أكتب: إنه من الطبيعى أن... من الملاحظات الطريفة.... ". كان الأسلوب أبعد عن أن يكون طبيعيا، وأهم ما فى الأمر العناء فى التدقيق والنقد الذاتى ومحاولة الإثبات. لقد اقتضت السياسة ما يلي: لو قلت من البداية إننى على وشك القيام بتغيير جذري، لفقدت اهتمام أغلب القراء".

وحين يسترجع ماندلبروت الذكريات، يجد أن الاعتراف به قد حدث فى مرحلة متأخرة بصورة تدعو للأسف. كانت المرحلة الأولى دائما: من أنت، وما سر اهتمامك بمجالنا؟ ثم الثانية: ما علاقة ما تقول بمجالنا، ولماذا لا تشرحه بناء على ما نعلمه بالفعل؟ ثم الثالثة: هل أنت متأكد أنها رياضيات؟ (نعم، جد متأكد) إذن، لماذا لا نعلم نحن بها؟ (لأنها قياسية، ولكنها غامضة للغاية)

فى ذلك تختلف الرياضيات عن الفيزياء. ففى الفيزياء متى أصبح فرع قديما أو غير مجد، فإنه يدخل على الفور ذمة التاريخ. قد يثير اهتماما أو استلهاما تاريخيا، ولكن فرعا من الفيزياء حين يكتب عليه الموت، فإنما يكون ذلك لأسباب جوهرية. الرياضيات على عكس ذلك، مليئة بالطرق والدروب التى لا تقود إلى أية فائدة عملية فى عصر ما، ثم تكون محور الاهتمام فى عصر آخر. إن قوة التطبيق لفكر تجريدى لا يمكن التكهن بها. لهذا السبب ينشد الرياضيون القيم الجمالية لأعمالهم، بالضبط مثل الفنانين. لهذا السبب تعرف ماندلبروت فى أبحاثه الأولى على الكثير من الأفكار السابقة التى كانت تنتظر أن يزال عنها الغبار.

ومن ثم فإن المرحلة الرابعة تكون: ما الذى يراه هؤلاء الأشخاص فى عملك؟ (أنهم لا يهتمون به قطعيا، لأنه لا يضيف شيئا للرياضيات، بل يندهشون للغاية أن عملهم لا يمثل الطبيعة فى شىء).

وأخيرا دخلت أشكاله كأداة فعّالة للوصف والقياس والتمعّن فى التشكيلات غير المنظمة: المجعدة والمهشمة والمثلومة، شواطئ البحار وتكوينات البرَد والغبار الكونى. إن

شكلا لماندلبروت يعنى هيكلا منتظما تحت ستار من تعقيد. ويستطيع طلاّب المراحل المتقدمة العبث بهذه الأشكال، فهى أولية مثلها مثل أشكال إقليدس. وأصبحت البرامج الحاسوبية البسيطة أداة فعالة لإنتاج مثل هذه الأشكال.

ووجد ماندلبروت أكبر قدر من تقبّل أفكاره من المشتغلين بالعلوم التطبيقية المستخدمة فى مجالات النفط أو الصخور أو المعادن، وعلى الأخص فى مراكز الأبحاث. وبحلول منتصف الثمانينات، على سبيل المثال، كان عدد كبير من باحثى مركز إكسون Exxon الضخم يعملون بمفهوم هندسته، وعلى نفس المفهوم كان باحثو شركة جنرال إلكتريك يعملون فى مجال البوليمرات، وكذا (بشيء من السرية) فى مجال أمان المفاعلات الذرية. وفى هوليوود، وجدت أشكاله تطبيقات لا تحصى فى إخراج المناظر التى تصور الطبيعة، وفى المؤثرات الفنية.

إن الأنماط التى اكتشفها أناس مثل يورك وماى فى بداية السبعينات، بحدودها المعقدة بين الانضباط والهيولية، كانت تحوى نظاما لا يمكن وصفه إلا على أساس العلاقة بين المقاييس الكبيرة والصغيرة. وقد بينت الهياكل الأولية للديناميكا اللاخطية أنها ذات طبيعة تنتمى لأشكال ماندلبروت الفراكتلية. كما وجدت هندسته تطبيقات هامة فى الفيزياء والكيمياء وعلم الزلازل وعلم المعادن ونظريات الاحتمالات والفسيولوجيا. هؤلاء الباحثون كانوا مقتنعين، وكانوا يقنعون غيرهم، بأن هندسة ماندلبروت هى ملِك للطبيعة.

لقد شنُّوا غارات شعواء على الرياضيات والفيزياء فى ثوبهما التقليدي، ولكن ماندلبروت نفسه لم يحظ بالاحترام الواجب فى هذين المجالين. وعلى الرغم من ذلك، لم يكن أمامهم إلا الاعتراف به. لقد قصَّ أحد الرياضيين مرة عن كابوس ألم به، رأى نفسه فيه وقد توفى، ثم جاءه صوت من السماء يقول: "أتعلم؛ إن هناك بالفعل شيئا ما فى ذلك الماندلبروت".

إن فكرة **التماثل الذاتى** كامنة فى الواقع فى أعماق الفكر. فهناك خط فى الفكر الغربى يشيد بها. لقد تخيل **لايبنز** أن نقطة الماء تحوى الكون بأسره، محتويا بدوره على قطرات أخرى تضم أكوانا أخرى. وحين اكتُشف الحيوان المنوى لأول مرة، ظن الناس أنه على شاكلة الإنسان الكامل.

ولكن التماثل الذاتى هُجِر كفكرة، لأسباب وجيهة. فهى لا تتفق مع الواقع. فالحيوان المنوى ليس إنسانا فى صورة مصغَّرة. لقد نبعت الفكرة من عدم فهم الإنسان لحقيقة

المقاييس. كيف يمكن تصور المتناهى فى الصغر والمتناهى فى الكبر، إلا على أساس ما هو معروف بالفعل.

وماتت الفكرة تماما باكتشاف المجهر والتلسكوب. فمع كل اكتشاف جديد، كان يبدو التغير الجذرى مع تغير مقاييس العوالم المكتشفة. وفى عالم الجسيمات دون الذرية، تكاد القصة لا تنتهى أبدا، فكل معجل أقوى طاقة وسرعة يدخلنا فى عالم أصغر حجما ومدى زمنيا، تنفرد أشخاصه بخصائص جديدة.

وللوهلة الأولى، تبدو فكرة ثبات الخصائص مع تغير المقاييس أقل معلوماتية، ذلك لأن العلم يتجه دائما نحو التجزئة والتحليل إلى العناصر الأولية، وتركيز الدراسة على كل عنصر على حدة. وفى دراسة التفاعل بين هذه العناصر الأولية، يضم المطلوب منها للدراسة فقط، وهنا يمكن النظر لتفاعل عنصرين أو ثلاثة أنه على قدر كاف من التعقيد. أما قوة التماثل الذاتى فتكمن فى النظرة الشمولية، ومن ثم فهى لا تظهر إلا على مستوى أكثر تعقيدا.

ورغم أن ماندلبروت هو من قام بأكثر استخدام شامل للهندسة المتولدة عن فكرة **الثبات المقياسى** scaling (ثبات الخصائص مع تغير المقاييس)، إلا أن عودة هذه الفكرة للعلم قد أضحت تيارا علميا فى الستينات والسبعينات ظهرت آثاره فى كثير من الأماكن. فالتماثل الذاتى كان موجودا ضمنيا فى أعمال لورنز، فقد كان جزءا من فهمه الذى استلهمه من الهيكل الدقيق المتولد عن معادلاته، هيكل أحس به، ولكن لم يستطع إظهاره على حاسوبه عام ١٩٦٣, كما أن مفهوم الثبات المقياسى قد أصبح جزءا من الحركة العلمية فى الفيزياء والتى أدت، أكثر مما أدت إليه أعمال ماندلبروت، إلى فكر الهيولية.

وحتى فى المجالات البعيدة، بدأ العلماء يفكرون على ضوء نظريات تستخدم التدرج الهرمى للمقاييس، كما فى علم التطور البيولوجي، حيث أصبح من الواضح أن نظرية متكاملة يجب أن تعيد تنظيم أنماط التطور فى الجينات، وفى الكائنات المفردة، وفى الأجناس، وفى عائلات الأجناس، فى نفس الوقت.

وربما يبدو أمرا محيِّرا أن يكون فهم فكرة الثبات المقياسى قد جاءت من توسيع نظرة الإنسان التى قتلت نفس الفكرة فى طور سذاجتها الأولى. ففى أواخر القرن العشرين تعرّف الناس على حقائق تجمع بين المتناهى فى الكبر والمتناهى فى الصغر بصورة لم تكن لتخطر على عقل بشر من قبل، من المجرات إلى دقائق الذرة. وقد أصبحت مثل هذه الصور جزءا لا يتجزأ من خبرات الإنسان المعاصر. وعلى اعتبار

شغف الإنسان الفطرى فى المقارنة والمقابلة، فقد اتجهت بعض الأنظار إلى البحث عن ملامح للتماثل بين الطرفين، وقد جاءت بعضها بنتائج بنّاءة.

وكثيرا ما كان العلماء المعجبون بهندسة ماندلبروت يشعرون بتوافق عاطفى بين صور الجمال فيها وبين القيم الجمالية للمدارس الحديثة فى الفن، والتى ظهرت فى وقت معاصر. كانوا يحسّون بأنهم يتلقون حماسا داخليا من الحضارة بأسرها. إن استلهام الجمال عن طريق التناسق الهندسى الإقليدى عصر قد ساد ثم ولّى، ولم يعد المعماريون اليوم يعنون، كما درجوا على ذلك ردحا من الزمن، باتخاذ بناية سيجرام فى نيويورك١٢ مثلا يحتذى فى تصميم ناطحات السحاب. لماندلبروت وأمثاله كان السبب واضحا، إن التناسق الهندسى لا يتفق مع الإحساس البشرى العميق بالجمال، حيث يفشل فى التوافق مع الطبيعة. وقد قال **جرت آيلنبرجر** Gert Eilenberger، وهو عالم اتخذ النظرية اللاخطية منهجا فى دراساته عن **التوصيل الفائق**: "لماذا تبدو صورة ظلّية لفرع شجرة عارٍ من الأوراق، منحنٍ فى مواجهة عاصفة، مفعمة بالأحاسيس الجمالية، بينما يخلو من ذلك مبنى حُشدت له إمكانيات التزيين والتنسيق الهندسي؟ إن السبب يبدو لي، وإن كان خلافيا، فى النظرة العميقة الحديثة للنظم الديناميكية. إن إحساسنا بالجمال يستلهم من التوافق بين المنتظم وغير المنتظم كما تكون فى الأشياء الطبيعية، السحب والجبال والأشجار وبلّورات الثلج. إن أشكال كل هذه الأشياء هى عمليات ديناميكية تجمدت فى صور فيزيائية، قوامها الجمع بين النظام واللانظام"

إن الشكل الهندسى يتميز بمقياسه، ومن وجهة نظر ماندلبروت فإن الفن الذى يشبع هو الفن الذى لا مقياس له، بمعنى أنه يحتوى على أهم خصائصه على كافة المقاييس. ففى مقابل **مبنى سيجرام** يعطى مثلا من متاحف الفنون الجميلة، بكل ما فيها من حوائط كثيرة الزوايا والأركان، وميازيب ذات تماثيل بشعة، ونوافذ ذات عضّادات غليظة. فالناظر للمبنى من بُعد يجد بعض التفاصيل تشد انتباهه، ومع اقترابه يتغير التشكيل مُظهرا عناصر جديدة.

إن تذوق التناسق فى مبنى شيء، والإعجاب بالطبيعة فى صورتها الفطرية شيء آخر تماما. لقد تغيرت وجهة القيم الجمالية، وتجاوب العلم مع هذا التغير. لقد وجد العلم أخيراً فائدة من أشكال كانتور وكوخ، التى شهدت الانفصال بين الرياضيات والفيزياء فى مطلع القرن، بعد أن تعايشا معا منذ عصر نيوتن. فالرياضيون من أمثال كوخ وكانتور كانوا فخورين بتميز مجالهم، متصورين أنهم قد بزوا الطبيعة فى الذكاء،

بينما هم فى الواقع لم يتفهموا قدرتها على الخلق والإبداع. فقط على يد سمول عادت الرياضيات لتخدم النظم الديناميكية.

على أنه على الرغم من سمول وماندلبروت، كان مقدرا للفيزيائيين أن يكونوا هم من وضع أساس علم الهيولية. ولقد قدم ماندلبروت اللغة المطلوبة، وكمّا من الاشكال المدهشة عن الطبيعة. وكما اعترف هو نفسه، إن برنامجه يصف أكثر من أن يشرح. فمن الممكن أن يقدم عناصر للطبيعة، مع أبعادها الكسرية، تفيد العلماء فى عمل التنبؤ، ولكن الفيزيائين يريدون معرفة المزيد. إنهم يبحثون دائما عن العلّة. إن هناك الكثير من الأشكال–ليست منظورة–بل متغلغلة فى ثنايا نسيج الحركة، تنتظر أن يكشف عنها.

---

i مرجعنا فى نطق الاسم هو الصديق المهندس عادل سيد عبد الجواد، خبير واستشارى حاسبات، والذى درس علم الهيولية باستفاضة خلال إقامته بألمانيا وفرنسا. المترجم.

ii توجد أساليب فى إرسال النبضات الحاملة للبيانات، تساعد على اكتشاف الأخطاء الناتجة عن التشويش error detection وتصحيحها error correction تعتمد على عملية تكويد الإشارات coding، والعلم الذى يتناول هذا الموضوع يسمى "نظرية المعلومات Theory of information"، سوف نلتقى به فى الفصل السابع– المترجم.

iii بالطبع للشواطئ طول محدد، ولكن الشكل الفراكتلى المثالى الذى يمثلها طوله مالا نهاية، إذ كلما صغر مقياس القياس زاد الطول، وهذا هو معنى العبارة الواردة فى المتن "من منظور معين". المترجم.

iv هذا المصطلح لحداثته ليس شائعا فى القواميس العلمية، وقد ورد مقابله فى قاموس الرياضيات المصوّر، الناشر مكتبة لبنان، "تشكيل جزئى، سطح أو منحنى جزئى"، وفى قاموس موسوعة مصطلحات الحاسوب، للدكتور علم الهدى حماد، الناشر American Global "متشكلات"، ونرى أن كلا الترجمتين لا يصلحان للتعبير عن المصطلح، علاوة على صعوبة الاشتقاق منهما. كما ورد فى مقابل فى مجلة العلوم التى تصدرها دولة الكويت هو "كسرانيات"، ولكنا نفضل تعريب المصطلح إلى: "فراكتل، الجمع: فراكتلات"، كما يمكن أن نطلق عليها "أشكال ماندلبروت" نسبة إلى مكتشفها– المترجم.

v لاحظ أن تكبير دائرة مثلا يخفى شكلها الحقيقى، بحيث يمكن أن تتصور كخط مستقيم عند درجة كبيرة من التكبير، وهو ما يجعل الواقف على الأرض لايكتشف كرويتها، بل يتصورها مسطحة، وينطبق هذا القول على كافة الأشكال الهندسية التقليدية– المترجم.

vi جسيم دون ذرى يتكون منه جسيمات أثقل مثل البروتونات والنيوترونات– المترجم.

vii يفرق فى التعريف بين الظاهرة المتصلة continuum والمجزأة discrete، وأفضل تشبيه لذلك تحركك بواسطة السلم الكهربائى مقابل ارتقائك السلم المعتاد ذو الدرجات– المترجم.



الجاذب العجيب

حين تستحيل التيارات السلسة إلى دوّامات مضطربة، فإنها تمثل مشكلة لها وزنها، فكّر فيها كل الفيزيائيين العظماء، بصورة رسمية وغير رسمية. إلا أن أغلب الأفكار كانت تأتى من الرياضيين، فبالنسبة للفيزيائيين تُعتبر هذه الاضطرابات ظاهرة فيها من الغموض ما يجعلها لا تستحق البحث.

لقد وصل الموقف بين الفيزيائيين فى دراسة **التيارات** إلى حل اصطلحوا عليه، فهم قد رسموا خطا تقع على جانب منه التيارات المضطربة، والتى صرفوا النظر عنها، وعلى الجانب الآخر توجد التيارات السلسة، وهو الجانب الذى وجدوا فيه مجالاً خصباً للعمل. ففى هذا الجانب تسير التيارات سيراً حسناً، إذ لا تتصرف كما لو كانت مكوّنا من ملايين القطرات المستقلة عن بعضها؛ فكل قطرتين متجاورتين يظلان على نفس التجاور، كحصانين فى مضمار. وللمهندسين أساليبهم فى التعامل مع التيارات، طالما كانت مستقرة. وهم فى ذلك يستخدمون معلومات تعود للقرن التاسع عشر، حينما كانت حركة السوائل والغازات فى مقدمة موضوعات الأبحاث.

ولكنها لم تعد كذلك فى القرن العشرين. لقد قُتل موضوع **ميكانيكا الموائع**[أ] fluid mechanics حتى لم يعد فيه مجال لمزيد من التفكير. وكان الجانب التطبيقى مفهوما لدرجة إمكانية تركه للفنيين، فلم يعد الموضوع قسما من أقسام الفيزياء، بل من أقسام كليات الهندسة. وكان التعامل مع الجانب التطبيقى للاضطرابات يسير فى اتجاه واحد، القضاء عليها بأية صورة! فى بعض التطبيقات تكون الاضطرابات مرغوبة، داخل محرك نفاث مثلا، حيث تعتمد كفاءة الاحتراق على سرعة **المزج**. ولكن فى الأعم الغالب تمثل الاضطرابات كارثة، فتيار هوائى مضطرب يُدمّر قوة الرفع على جناح الطائرة. إن أموالاً طائلة تُنفَق على تصميم الطائرات والمحركات الطوربينية والرفاصات وأبدان الغواصات، والأشكال الأخرى التى تسير فى أوساط من الموائع. كما تشمل الأبحاث تدفُّق الدم فى الأوعية الدموية، وشكل وتطور الانفجارات، والدوامات واللهب والموجات الصدمية. فى مشروع القنبلة الذرية، كانت

المسائل الجوهرية قد قاربت الحل عند بدء المشروع، وكان الشغل الشاغل للباحثين فى لوس ألاموس هى مشاكل ديناميكا الموائع.

ما هو الاضطراب إذن؟ إنه خليط من اللانظام على كل المستويات، دوّامات صغرى ضمن دوامات أكبر. إنه حالة لا تعرف الاستقرار، **مشتتة للطاقة**، عشوائية الحركة. ولكن كيف يتحوّل تيار من حالة السلاسة إلى حالة **الاضطراب**؟ لنفرض أن لدينا أنبوباً ناعماً تماماً، زُوِّد بمصدر ثابت من الماء، معزول كلية عن الاهتزازات، كيف يمكن أن يتحول تيار كهذا للعشوائية؟

كل القوانين تبدو منهارة، فحين يكون التيار سلسلاً، تموت الاضطرابات الطفيفة على الفور. ولكن ما أن نتجاوز نقطة ابتداء الاضطراب، حتى تتصاعد بصورة خطيرة. وتمثل نقطة الابتداء هذه أمراً غامضا بالنسبة للعلم، القنوات تحت الصخور لتيار مائى تتحول إلى دوّامات تكبر وتنقسم وتلف سارية مع التيار. عمود دخان من السيجارة يرتفع كاسطوانة منتظمة، ثم يتحول إلى دوائر دوّامية بعد عبوره لقيمة حرجة من سرعته. يمكن لبداية الاضطراب أن يُسجَّل ويقاس فى المعمل، وأن يختبر لجناح طائرة أو رفّاص سفينة، ولكن طبيعته تظل لغزاً. والمعرفة فى هذا المجال تكون خاصة لا عامة، فالتجارب على جناح طائرة بوينج ٧٠٧ لا علاقة لها بتجارب على جناح ف-١٦. حتى الحواسب العملاقة تبدو أقرب للعجز أمام هذه الظاهرة.

شيء ما يهز السائل فيثيره. والسائل ذو لزوجة، بحيث أن الطاقة تتشتت منه. وحين يخمد الاهتزاز، يعود السائل بطبيعة الحال للسكون. فأنت حين تهز السائل تضيف طاقة له، تكون ذات تردد بسيط (طول موجى كبير)، وأول شيء تلاحظه أن الطول الموجى الكبير قد تكسّر إلى ما هو أصغر. وتتكون **الدوامات**، وتتكوّن دوامات أصغر بداخلها، كل يشتت طاقة السائل ويخلق إيقاعاً خاصا به.

فى عام ١٩٣٠ وضع أ. ن. **كولموجوروف** A. N. Kolmogorove وصفا رياضياً أعطى الإحساس بكيفية عمل هذه الدوامات. فقد تصور تتابعاً فى مستوى الطاقة هبوطاً إلى أصغر مقياس ممكن، إلى أن تكون الدوامات من الصغر بحيث لا تستطيع أن تتغلب على لزوجة السائل.

وللحصول على وصف طيب، تصورً كولموجوروف أن هذه الدوامات سوف تغطى السائل بأكمله بصورة تجانسية، ولكن اتضح أن هذا التصور غير صحيح، وحتى **بوانكريه** قد أدرك ذلك منذ أربعين عاماً، حين وجد اختلاطاً مستمراً على سطح النهر

الهائج بين مناطق دوامية ومناطق من تيار سلس. هذه الصورة اللامتجانسة، حين توضع فى صورة مثالية لحد ما، فإنها تكون منتمية **لأشكال ماندلبروت** بقدر كبير، بما فيها من تداخل بين مناطق الاضطراب ومناطق السلاسة، على مستويات تصغر شيئا فشيئا. على أن هذه الصورة بدورها يتضح أنها تختلف عن الواقع إلى حد ما.

ومن الأسئلة القريبة من ذلك، ولكن متميزة تماما، هو السؤال عما يحدث حين يبدأ الاضطراب. كيف يعبر السائل حالة السلاسة إلى حالة الاضطراب؟ ما هى الحالات البينية فيما بين الحالتين؟ لهذه الأسئلة وضعت نظرية أقوى قليلاً، وضعها العالم السوفيتى الشهير **ليف لاندو** Lev Landau، الذى احتل موضعا مرجعيا فى مجال ميكانيكا الموائع. يقوم تصور لاندو على تراكم من الذبذبات، بمعنى أن كل طاقة تُضاف للنظام يبدأ معها ذبذبة جديدة فى الانضمام إلى ما هو موجود أصلاً منها، كما لو أن وترا فى كمان يستجيب لكل زيادة فى العزف بإخراج تردد ثان وثالث.

يتكون أى سائل أو غاز من جزيئات متناهية الصغر، تبلغ من كِبَر العدد ما يجعلنا نتصورها لانهائية. فلو أن كل جزيء تصرف على انفراد، لكان أمامنا عدد لانهائى من الاحتمالات، أو من "درجات الحرية" كما يُعبَّر عنها اصطلاحاً، ولاحتوت معادلة الحركة على عدد لانهائى من المتغيرات. ولكن الجزيئات لا تتصرف على استقلال، بل ككل متكامل. وفى حالة التيار السلس، تكون درجات الحرية قليلة العدد. الجزيئات المتقاربة تسير إما متقاربة، أو تتباعد بطريقة خطية. وجزيئات الدخان المتصاعد من السيجارة تسير فى شكل أسطواني، حتى حين.

ثم يبدأ الاضطراب. سيرك من تحركات متهيِّجة، قد يعطى بعضها أسماء؛ ترددية، متأرجحة، عقدية، مغزلية، دوامية. من وجهة نظر لاندو، كل هذه الصور من الحركات تتكاثف فوق بعضها البعض، معطية خليطا غير متجانس من السرعات والأحجام. هذه الفكرة التقليدية عن الاضطراب تبدو موافقة للواقع. وإذا كانت النظرية فقيرة المستوى رياضياً، فليكن ذلك. صورة من الاحتفاظ بماء الوجه حين رفع الأيدى بالتسليم.

يمر الماء فى أنبوب، مُصدرا همساً خافتاً. تصور أنك زدت فتحة الصنبور، مُزيداً من ضغط الماء. سوف تسمَع نغمة ترددية وقد بدأت تقرع جدران الأنبوب. زد مرة أخرى، من مكان ما تبدأ ذبذبة أخرى فى الظهور، غير متوافقة مع الأولى، ولكن متداخلة معها. مع استمرار زيادة الضخ تظهر ثالثة ورابعة، ويصبح التيار معقداً للغاية. ربما يكون هذا هو الاضطراب. لقد تقبل الفيزيائيون هذه الصورة، ولكن ما من أحد كان بمقدوره حساب متى تظهر الذبذبة الجديدة، أو مقدارها. ما من أحد رأى

هذه الترددات العجيبة تجريبيا، لأنه ما من أحد فى الواقع قد اختبر نظرية لاندو عن تكوِّن الاضطراب.

■ ■ ■

يجرى واضعو النظريات التجارب بأذهانهم، بينما يجريها التجريبيون بأيديهم. الأول مفكرون، والآخرون مهنيون. الأوَّل لا شريك لهم فى العمل، والآخرون لهم مساعدون، وطلاب دراسات عليا يشرفون عليهم، وفنيو المعامل. يعمل المنظِّرون (واضعو النظريات) فى جو مثالي، لا ضوضاء، لا اهتزازات، لا تلوث، بينما التجريبيون قد خلقوا مع المادة وداً كالذى بين النحّات والصلصال. المنظرون يخلقون رفقاءهم، مثل روميو ساذج يتخيل محبوبته المثالية، أما رفقاء التجريبيين فيعرقون، ويشتكون، ويتذمرون.

لا غنى لأى منهما عن الآخر. على أنه منذ ولّى زمن اجتماعهما فى شخص واحد، وصورة من اختلال التوازن قد بدت بينهما، حيث احتفظ التجريبى بشيء من شخصية المنظِّر، بينما العكس غير صحيح. وتدريجياً بدأ التبجيل يميل إلى جانب المنظِّرين. ففى مجال الفيزياء عالية الطاقة، فاز المنظرون بنصيب الأسد من الشهرة، بينما تحول التجريبيون إلى فنيين عاليى التخصص، يتعاملون مع أجهزة ومعدات باهظة الثمن غاية فى التعقيد. وقد بدا ذلك واضحا أشد الوضوح فى مجال فيزياء الجسيمات دون الذرية، حيث تزداد المعجلات طاقة إلى حد غير متصور، كما ازداد طاقم التجارب عددا حتى وصل إلى العشرات، بل والمئات.

ولكن ظل بعض التجريبيين يفضِّلون العمل فرادى أو فى مجموعات صغيرة، يعملون مع مواد فى متناول اليد. وبينما فقدت مجالات مثل ميكانيكا الموائع وضعها، اكتسب مجال "فيزياء الجوامد، أو الحالة الصلبة "solid state وضعا مرموقا، متوسعا فى مجاله حتى أصبح مع الزمن محتاجا لاسم جديد؛ "فيزياء المادة المتكاثفة condensed matter". فى هذا المجال تكون المعدات أبسط، والفجوة بين المنظرين والتجريبيين أضيق قليلا، الأُول أقل تعالياً، والآخرون أقل دفاعية.

وحتى مع ذلك، فإن وجهات النظر ظلت مختلفة. فمن المألوف تماما أن يقف منظِّر مُقاطعا محاضرة لتجريبى قائلا: "أليست البيانات أقل قليلا مما يجب؟ أليس هذا الشكل البيانى غامضا بعض الشيء؟ ألم يكن من الأفضل مد نطاق التجربة؟

ورداً على أسئلة كهذه، كان من المألوف أيضا أن يشد **هارى سوينى** Harry Swinney قامته إلى أقصى طولها البالغ خمسة أقدام ونصف القدم، ويقول بمزيج من لهجة لويزيانا الأصيلة الفاتنة، ولهجة نيويوك الغضوبة: "هذا حق، لو كان لديك عدد لانهائى من البيانات الخالصة" ثم يستدير منصرفا إلى سبورته قائلا: "ولكن ما لديك واقعا هو عدد من البيانات المحدودة، والمعرضة للتشويش".

كان سوينى تجريبيا ذا شأن، جاءته نقطة التحول حين كان طالبا مفتونا بفيزياء الجسيمات الأولية ككل قرنائه، حيث كان اسم **مورى جلمان**[ii] Maury Gell-Mann له وقع السحر عليهم. ولكنه حين نظر لما يفعله الباحثون الشبّان عادة، وجد أن عملهم محصور بين كتابة برامج حاسوبية، أو تجهيز غرف الضباب. عندئذ تحدث مع فيزيائى أسنّ منه، يعمل فى مجال **تحول الطور** phase transition، كالتحول من حالة السيولة إلى حالة الصلابة، أو من حالة اللامغنطة إلى حالة المغنطة، أو من التوصيل إلى التوصيل الفائق. وسرعان ما كان لسوينى حجرته، ليس أكبر كثيرا من خزانة الملابس، ولكنها كانت خاصة به، ما لبث أن عبأها ببعض أجهزة التبريد، وبعض المعدات العلمية. وصمم جهازا لاختبار مدى التغير فى قابلية ثانى أكسيد الكربون لتوصيل الحرارة عند النقطة الحرجة لتحوله من غاز إلى سائل. كان الظن الغالب أن التغيير طفيف، فوجده سوينى أكبر فى حدود ألف مرة. كان شيئا مثيرا، أن يكتشف وحده فى غرفة ضيقة ما لم يعلمه أحد من قبل. لقد رأى الضوء الذى يشع من الغاز، أى غاز، عند تلك النقطة الحرجة، ضوء خفيف يعطى وميض مادة الأوبال.

وكمثل الحالة الهيولية بقدر كبير، يتضمن تحول الطور نوعا من التصرف على المقياس الكبير لا يمكن أن يتوقع عند النظر للجزيئيات. عندما يسخن معدن، فإن الجزيئات تتذبذب بسبب الطاقة المضافة، مجبرة المادة على التمدد. مزيد من الحرارة، مزيد من التمدد. وعند نقطة معينة، يصبح التغير فجائيا غير متّصل. يتلاشى الشكل البلّورى، وتنزلق الجزيئات مقابل بعضها البعض، متبعة قوانين السوائل التى لم تكن متصوّرة فى الحالة الصلبة. الطاقة المتوسطة للذرات لم تتغير، ولكن المادة، وقد تحولت إلى السيولة، أو المغنطة، أو التوصيل الفائق، قد دخلت عالما جديدا.

فى معامل شركة AT&T Bell بنيوجرسى اختبر **جينتر آلرز** Günter Ahlers ما يسمّى **التحول السائلى الفائق** superfluid transition للهيليوم السائل، والذى فيه، مع انخفاض الحرارة، تصبح المادة نوعا من سائل سحرى يسيل بلا لزوجة أو احتكاك. ودرس آخرون ظاهرة التوصيل الفائق. ودرس سوينى النقطة الحرجة حيث تتحول

المادة من سائل لبخار. فى منتصف السبعينات كان التجريبيون من أمثال سوينى وآدلرز، من كل البلدان المتقدمة، المشتغلون بدراسة تحول الطور، ينظرون فى مشاكل جديدة. لقد عرفوا العلامات المميزة لمسار تغير المادة من طور إلى آخر، ودرسوا الوضع الحرج الذى تتوازن عليه المادة.

ويحمل هذا المسار الكثير من التشابهات. تشابه بدا بين حالات التحول المختلفة: التحول من المغنطة إلى اللامغنطة، والتحول من السيولة إلى الغازية، والتحول من السيولة إلى السيولة الفائقة، والتحول من التوصيل إلى التوصيل الفائق. فالرياضيات المطبقة فى تجربة ما هى ذاتها ما يطبق فى تجارب أخرى. وفى السبعينات كانت المشكلة قد حلَّت بقدر كبير، ولكن التساؤل كان حول مدى إمكانية بسط نطاقها. ما التحولات الأخرى فى الكون، عندما تختبر عن قرب، يمكن أن تعتبر تحولاً فى الطور.

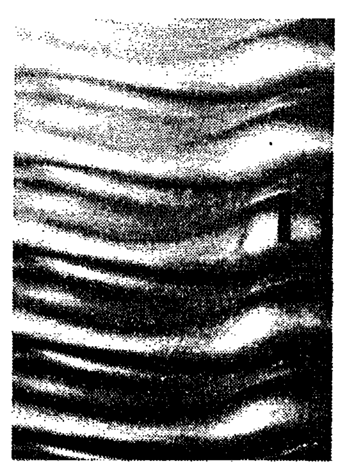
لم تكن فكرة تطبيق تحول الطور على تدفق السوائل لا هى بالفكرة الأكثر جدة ولا الأكثر وضوحا. لم تكن الأكثر جدة لأن رواد ديناميكا الموائع، **راينولد** Reynold **ورايلاى** Rayleigh قد لاحظا فى مطلع القرن العشرين أن تجربة محكومة جيدا للسوائل تنتج نوعا من تغير حالة الحركة، وبعبارة رياضية تنتج مع زيادة الحرارة ما يسمى "**التفرع الثنائى** bifurcation" كان الفيزيائيون ميّالين إلى اعتبار هذا التفرع يتشابه مع تغيرات تحول الطور.

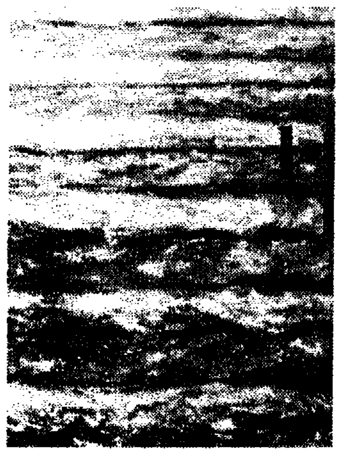
ولم تكن الأكثر وضوحا لأن هذا التفرع، على عكس تحول الطور، لم يكن يصاحبه تغير فى طبيعة المادة ذاتها، بل هو بدلا من ذلك يدخل عنصرا جديدا، الحركة. لقد تحول السائل الساكن إلى متحرك. لماذا يجب أن تتبع رياضيات هذا التغير تلك التى تخصّ تكاثف الغاز؟

■ ■ ■

فى عام ١٩٧٣ كان سوينى يقوم بالتدريس فى سيتى كولدج بنيويورك، بينما كان **جيرى جولب** Jerry Gollub يدرس فى هافرفورد. ولم تكن هذه المدرسة الريفية التى أنشئت للفن الحديث تبدو مكانا مناسبا ينتهى إليه الفيزيائيون، حيث لم يكن بها طلبة دراسات عليا تساعد الباحثين. ولكن جولب أحب التدريس للطلاب المبتدئين، وبدأ فى تطوير قسم الفيزياء إلى مركز للتجارب أصبح ويشار إليه بالبنان. وفى ذلك العام اتجه جولب إلى نيويورك ليتعاون مع سوينى.

مع التشابه بين تحوّل الطور وعدم اتزان السوائل، بدأ الاثنان فى دراسة نظام كلاسيكى يضم سائلا محصورا بين اسطوانتين رأسيتين ومتداخلتين، تشد الداخلية عند دورانها السائل معها حولها، وهى بذلك تحصر الفراغ المتاح للسائل. ٣ ومع ازدياد سرعة الدوران، تظهر نقطة اللاتوازن الأولى. يصنع السائل نمطا جميلا من أشكال تشبه رصّة من الكعك تحيط بالاسطوانة. فجزيئات السائل لا تتحرك فى حركة دورانية فقط، بل تتحرك أيضا إلى أعلى وإلى أسفل، وأماما وخلفا. كان هذا النمط معروفا منذ العشرينات.





شكل ١-٥ التدفق خلال الاسطوانات الدوارة: أعطت أنماط تدفق الماء بين اسطوانتين هارى سوينى وجيرى جولب طريقة للنظر إلى كيفية بدء الاضطراب. مع

زيادة معدّل اللف، يزداد النمط تعقدا . فى البداية يكون الشكل أشبه بفطائر متراصّة فوق بعضها البعض، ثم تبدأ الفطائر فى الاهتزاز. استخدم العالمان أشعة الليزر لقياس تغير سرعة الماء مع كل اختلال فى الاتزان يظهر من جديد.

ولاستمرار الدراسة طور سوينى وجولب جهازا يصلح للوضع على مكتب، اسطوانة زجاجية خارجية فى حجم علبة كرات التنس، حوالى قدم فى الارتفاع وبوصتين فى القطر، تنفذ خلالها برشاقة اسطوانة أخرى من الصلب، بدقة تجعل الفراغ بين الاثنين ثُمن البوصة، حيث يتحرك السائل. وقد وصف فريمان دايسون – أحد أفراد السيل الذى لم ينقطع من زوّار المعمل على مدى الأشهر التالية – المشهد قائلا: "هذان السيدان فى معملهما الضيق المزدحم، بقليل من المال، يجريان تجربة على أعلى درجات الجمال، لقد كانت بداية العمل العلمى الحقيقى للاضطرابات".

كانا يجريان تجربة فى موضوع شائع، من شأنه أن يحقق لهما نجاحا بقدر ما يصلان إليه. فكل ما هدفا إليه هو تحقيق فكرة لاندو عن بدء الاضطراب. ولم يكن هناك مجال للشك فى نتيجة التجربة، فهما يعلمان أن السوائل تخضع بالفعل لفكرة لاندو، وهما معجبان بها لأنها تتفق مع الصورة العامة للتحول الطوري. وحين أجرى سوينى تجربته عن النقطة الحرجة بين السائل والغاز لثانى أكسيد الكربون، كان يجريها ولديه اقتناع بفكرة لاندو لدرجة أنه توقع أن تصدق نتيجة تجربته على غاز الزينون، وهذا ما حدث بالفعل. لماذا إذن لا يحقق الاضطراب صورة التكدّس المتوالى للترددات فى السوائل المتحركة؟

أعدَّ الباحثان عدتهما للتغلب على صعوبات قياس السوائل حين اضطرابها، بترسانة من التقنيات الحديثة والدقيقة، تمخّضت عن سنوات من دراسة تحول الطور فى أشد الظروف دقة وحساسية. كان لديهما أساليب وطرق معملية للقياس لم تدر بخلد باحث فى هذا المجال من قبل. فقد استخدما ضوء الليزر لسبر غور السائل الدّوار[iv] فالضوء الساقط على الماء المتحرك يعانى من انعكاس أو من تشتت يمكن قياسهما بدقة بالغة بطريقة تسمى طريقة **تداخل دوبلر**، ويوجه سيل البيانات إلى جهاز الحاسوب، والذى نادرا ما كان يرى وقتها فى معمل على هذا المستوى.

قال لاندو أن الترددات سوف تظهر مع زيادة السرعة، ترددا بعد الآخر. ويقول سوينى متذكرا: "على ذلك أخذنا فى القراءة، وسار الأمر على ما يرام، نظرنا ووجدنا التحول واضحا لا مراء فيه، وأخذنا نزيد ونقلل من السرعة، كل شيء واضح ومحدد. قلنا لأنفسنا: حسنا، لنتجه الآن للتحول التالى".

هنا انهار توقع لاندو تماما. عند التحول التالى تراقصت جزيئات الماء فى كافة الاتجاهات، دون أى ملمح لتردد منتظم على الإطلاق. لقد فشلت التجربة فى تأييد نظرية لاندو. لا ترددات جديدة، ولا تصاعد تدريجى منتظم للتعقيد. "إن ما وصلنا إليه كان فوضى شاملة"، وبعد عدة أشهر، ظهر بلجيكى نحيل غاية فى الدماثة لدى باب المعمل.

■ ■ ■

ولد **دافيد رويل** David Ruelle فى جنت Ghent عام ١٩٣٥، ووجد نفسه شَغفاً بالكيمياء. ورغم أنه شق طريقه العلمى فى مجال العلوم البحتة، إلا أنه كان يهيم دائما بالجانب الخطر من الطبيعة التى تخفى مفاجآتها فى فطر عيش الغراب اللازهري، أو فى الكبريت والفحم والملح الصخرى.

ولكن دور رويل فى اكتشاف الهيولية كان فى مجال الفيزياء الرياضية. فبحلول ١٩٧٠ كان قد التحق بمعهد الدراسات المتقدمة بباريس، والذى أنشئ على غرار المعهد الذى يحمل نفس الاسم فى برينستون. وكان قد اكتسب عادة لم تفارقه طوال حياته، هى اقتطاع أوقات للقيام بالجولات الخلوية فى بقاع الأرض، من أيسلندا إلى المكسيك، ليرى العالم على فطرته على حد قوله. وكان قد سمع عن **حدوة سمول** والاحتمالات الهيولية للنظم الديناميكية، كما كان يفكر أيضا فى اضطرابات السوائل وصورة لاندو الكلاسيكية عنها، وتولّد لديه ظن بوجود صلة بين الموضوعين، وأنهما متعارضان.

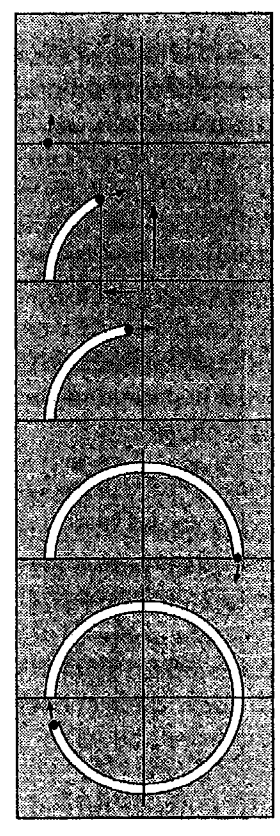
لم يكن لدى رويل خبرة بسريان السوائل، ولكن ذلك لم يقعده. كان يقول "إن غير المتخصص كثيرا ما يجد أشياء جديدة، ولم تكن هناك نظرية عميقة عن الاضطراب، فكل الأسئلة التى تسأل ذات طبيعة عامة، ولذا فهى متاحة لغير المتخصصين." كان من السهل معرفة سر امتناع الاضطراب على التحليل، فمعادلات حركة السوائل من نوع المعادلات التفاضلية الجزئية اللاخطية، وهى غير قابلة للحل إلا فى حالات استثنائية. على أن رويل كتب بحثا عن صورة بديلة لصورة لاندو، بالمشاركة مع رياضى هولندى هو **فلوريس تاكينز** Floris Takens، مصاغا بلغة سمول، حيث الفراغ يمكن التلاعب فيه بالطى والانكماش والمط إلى شىء أشبه بحدوة الحصان.

نشر البحث عام ١٩٧١، وكان يحمل نكهة رياضية لا تنكر، ومع ذلك فقد كانت به لمحة الاتصال بالعالم الواقعي. كان عنوانه "**حول طبيعة الاضطراب** On the Nature of Turbulence" والذى يحمل تلميحا واضحا إلى بحث لاندو " **حول مسألة الاضطراب** On the Problem of Turbulence". كان من الواضح أنهما يقدّمان بديلا لفكرة لاندو عن بدء الاضطراب. بدلا من تراكم الترددات، مما يؤدى إلى عدد لانهائى من التحركات المتداخلة وغير المترابطة، اقترحا ثلاثة عناصر من الحركة فقط يمكن أن تنتج التعقد الكامل للاضطراب. من وجهة النظر الرياضية كان البحث غامضا، أو خاطئا، أو منقولا، أو الثلاثة معا، آراء ظلت متعارضة لخمسة عشر عاما تالية.

ولكن ما كان فى البحث من نفاذ بصيرة، وتعليقات، وحواش، وفيزياء مُضَمّنة، جعلت منه هبة خالدة، أهم ما فيها كانت الفكرة التى أطلقا عليها "الجاذب الغريب[v] strange attractor" عبارة ذات إيحاء نفسي، كما أحس بذلك رويل فيما بعد. كان وقعها المتميز فى دراسة الهيولية لدرجة أنه مع تاكينز قد تصارعا تحت السطح فى أدب على من له شرف ابتداع المصطلح.

يعيش الجاذب العجيب فى **فضاء الطور**، واحد من أقوى الاختراعات للعلم الحديث. ففضاء الطور يعطى وسيلة لتحويل الأرقام إلى رسومات، كل نقطة فيها تحمل معلومات عن النظام المتحرك، أجزاء ميكانيكية أو سائل متدفق، ويعطى وسيلة ميسرة لوضع خريطة لكافة الاحتمالات. وقد تعامل الفيزيائيون بالفعل مع نوعين أبسط من الجاذبات: النقاط الثابتة، والدوارات المحدودة، يمثلان النظام الذى يؤول إلى حالة الثبات، والنظام الذى يتكرر على الدوام[vi].

فى فضاء الطور تمثل كافة المعلومات عن حالة نظام ديناميكى عند لحظة معينة فى نقطة واحدة. هذه النقطة هى النظام الديناميكى فى هذه اللحظة. عند اللحظة التالية تكون نقطة أخرى، منحرفة عن الأولى بقدر ضئيل. فيمكن بذلك رسم تاريخ النظام عن طريق مسار تلك النقاط مع تغير الزمن.

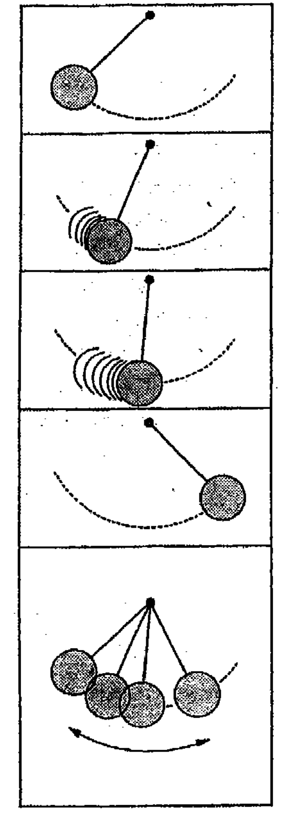


السرعة صفر عندما يبدأ البندول اهتزازه. الموضع مقاس من نقطة المنتصف يأخذ قيمة سالبة، أقصى ارتفاع جهة اليسار.

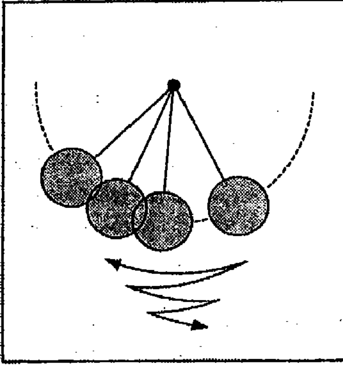
الرقمان يمثلان بعدى نقطة على فضاء الطور.

تصل السرعة أقصى قيمة لها عندما يعبر الثقل نقطة المنتصف، الموضع صفر.

تهبط السرعة مرة أخرى إلى الصفر عند وصول الثقل أقصى ارتفاع جهة اليمين، ثم تكون السرعة سالبة، لكونها فى الاتجاه المضاد، ثم يكمل الشكل فيكون دائرة كاملة.



طريقة أخرى لرؤية البندول: نقطة على **فضاء الطور** (يمين) تحتوى على بيانات عن حالة النظام عند أية لحظة (يسار). للبندول البسيط لا نحتاج إلا لرقمين، أحدهما يعبر عن الموضع والآخر عن السرعة.

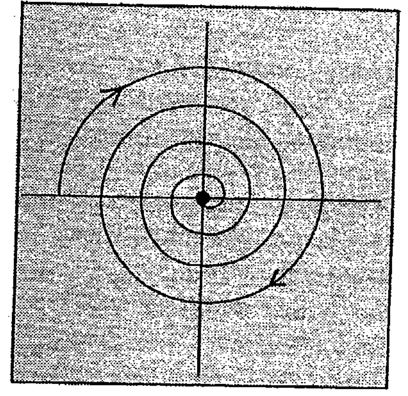


النقاط ترسم مسارا يقدم وسيلة لتصوّر التصرف الدائم على المدى الطويل للنظام الديناميكى، المنحنى المغلق المتكرر يمثل نظاما فى حركة ترددية منتظمة.

إذا كان النظام مستقرا، كبندول الساعة الذى نعرفه، فإن أى اضطراب طفيف فى النظام سرعان ما يذوى ليعود للحركة المنتظمة مرة أخرى. فى فضاء الطور تظهر الاضطرابات كاهتزازات فوق المسار الأصلى، والذى يعتبر الجاذب للنظام.

كيف يمكن تجميع معلومات عن نظام ما فى نقطة واحدة؟ فى حالة نظام ذى متغيرين فقط، الإجابة سهلة. إنها مباشرة من الهندسة الكارتيزية التى تدرس فى المرحلة قبل الجامعية، أحد المتغيرين يمثل على المحور الأفقي، والثانى على المحور الرأسي. لو كان النظام بندولا مهتزا دون احتكاك، فإن أحد المحورين سيمثل الموضع، والثانى السرعة، وهما يتغيران باستمرار، فيرسمان منحنيا مغلقا يكرر نفسه على الدوام. وبالنسبة للنظام الأعلى طاقة، حيث تكون الذبذبة أسرع، يرسم النظام منحنى مشابها، ولكنه أكبر.

بقليل من الواقعية، على صورة إضافة شيء من الاحتكاك، تتغير الصورة. لسنا محتاجين لمعادلات لنعلم مصير النظام فى هذه الحالة، فهو لا بد سينتهى إلى نقطة واحدة يسكن عندها، الموضع صفر، والسرعة صفر. هذه النقطة المتوسطة "تجذب" المسار إليها، فبدلا من أن يدور ملتفاً على نفسه، يتلولب إلى أن يستقر إلى تلك النقطة. فالاحتكاك يشتت طاقة النظام، ويتمثل ذلك على فضاء الطور كجذب تجاه النقطة المركزية، من المناطق البعيدة الممثلة للطاقة العالية إلى القريبة منها التى تمثل الطاقة الأقل.



شكل ٣-٥ قد يكون الجاذب نقطة، فبالنسبة لبندول يفقد طاقته باستمرار بسبب الاحتكاك، ترسم كل المسارات لولبا يتجه لنقطة واحدة، تمثل الحالة الثابتة، وهى هنا نقطة السكون (الموضع صفر السرعة صفر).

ومن مزايا التفكير فى حالات النظام كنقاط فى فضاء هو تيسير تصوير التغير. فالنظام الذى تتغير عوامله باستمرار يصبح أشبه بذبابة طائرة فى حجرة، فإذا كانت بعض الاحتمالات غير متوقَّعة بالمرة، فإن العلماء يعتبرون ذلك حدوداً للنظام، وكأن جزءا من الغرفة محرَّم على الذبابة ارتياده. وإذا كان النظام يتذبذب بحيثُ يمرّ بنفس النقطة فى كل دورة، فإن الذبابة سوف تطير فى منحنى مغلق، زائرة نفس الموقع عليه مرّات ومرّات. وحين ينظر العالم إلى منحنى **فضاء الطور** فإنه يسترجع على الفور النظام نفسه؛ هذا المنحنى المغلق يقابل هذه الحركة الترددية، هذا الالتواء يمثل ذلك التغير، هذه المنطقة الفارغة تمثل الاحتمالات المستحيلة.

حتى على مستوى بعدين فقط، فإن لفضاء الطور مفاجآت لا تنتهي، ويمكن للحاسوب أن يظهرها، محولا المعادلات إلى مسارات متحركة ملونة تثير البهجة فى النفوس.

ولكن البعدين لا يفيان بالحاجة العملية للدراسة، فالنظم لها عادة أكثر من متغيرين، ويعنى هذا الحاجة للمزيد من الأبعاد. فكل عنصر إضافى يمكنه أن يتغير على استقلال فى النظام يعنى درجة إضافية للحرية، تحتاج إلى بعد إضافى لتمثيلها فى فضاء الطور، حتى يمكن لكل نقطة فيه أن تمثل النظام تمثيلا تاما. كانت المعادلات التى درسها ماى بسيطة، ذات بعد واحد، يكفى رقم واحد لتمثيل حالاتها، قد يعبر عن درجة الحرارة أو عن التعداد، وهذا الرقم يحدد النقطة على خط فضاء الطور. وكانت معادلات لورنز عن تيارات الحمل ذات ثلاثة متغيرات، ليس لأن السائل يتحرك فى فضاء ثلاثى الأبعاد، ولكن لأن المعادلات تحتاج لثلاثة أرقام لتحديد حالة النظام فى لحظة ما.

أما الفراغ الذى يكون له أربعة أو خمسة أبعاد أو أكثر، فإن العقل البشرى يعجز عن تصوره. ولكن النظم تحتوى بالفعل على العديد من المتغيرات المستقلة. ولو كان النظام له عدد غير محدود من المتغيرات، فإنه محتاج لعدد لا نهائى من الأبعاد. إنه نظام فظيع بشع غير خاضع لسيطرة، وهذه فى الواقع فكرة لاندو عن الاضطراب.

■ ■ ■

للفيزيائيين كل الحق فى كراهية نموذج لا يمثّل الحقيقة. واستخدام المعادلات اللاخطية فى معادلات حركة السوائل يجعل أقوى حاسوب غير قادر على متابعة الاضطراب فى قدم مكعبة من سائل لأكثر من عدة ثوان. فى مثل هذه الحالة يحق للفيزيائى أن يتصوّر أن عنصرا ما من الحقيقة لم يكشف عنه بعد. وكمثل الكثيرين ممن بدءوا فى دراسة الهيولية، كان رويل يحس بأن الاضطراب فى تدفق السوائل لا بد أنه يخضع لقوانين لم يتم الكشف عنها بعد. وفى ذهنه كان يرى أن تشتُّت الطاقة فى تدفُّق مضطرب يجب أن يؤدى إلى نوع من الانكماش فى فضاء الطور نحو جاذب معين. بالتأكيد هذا الجاذب ليس نقطة، لأن التدفق لا يعرف السكون. إن الطاقة تصب فى النظام كما تتشتت منه. أى نوع من الجاذبات يمكن أن يكون؟ طبقا للعقيدة السائدة لا يوجد سوى نوع آخر، الجاذب الدورى الذى يمثل دورة مستقرة، مسار منجذب إلى كافة المسارات الأخرى القريبة منه. لو أن بندولا يتأرجح ويستمد طاقة تعوض تلك التى تتشتت نتيجة الاحتكاك، فإن المسار فى فضاء الطور سوف يكون منحنى منغلقا كما سبق شرحه. لا يهم من أى موضع يبدأ، فهو سوف يستقر على

مسار معين. أحقا ذلك؟ إن هناك بعض الأوضاع المبدئية، تلك التى لها طاقة غاية فى الضآلة، سوف تجعل البندول يؤول للسكون. النظام على ذلك له جاذبان، الأول منحنى مغلق، والثانى نقطة.

فى المدى القصير تُعتبر كل نقطة فى فضاء الطور ممثِّلة لحالة فى النظام الديناميكي. أما على المدى الطويل، فإن الجاذب هو الذى يمثل الحالة النهائية وصور التحرك الأخرى هى وقتية. وطبقا للتعريف، للجاذبات خاصية هامة هى الاستقرار. وفى الواقع العملي، حيث تتعرض النظم للشد والجذب من المؤثرات الخارجية، فإن النظام يميل إلى الرجوع للجاذب. قد تدفع خبطة عارضة بالنظام إلى الابتعاد، ولكنها حالة وقتية لن تلبث أن تزول. حتى لو قفزت قطة فى داخل الساعة، فإن بندولها لن يتحول إلى نظام تكون الدقيقة فيه خمس وستون ثانية. أما اضطراب السوائل فأمر آخر. إنه لا يستقر على الإطلاق على اهتزاز ذى تردد معين مستبعداً الاهتزازات الأخرى، بل إن كل أنواع الاهتزازات مسموح بها فى نفس الوقت بصورة مستقرة. هل يمكن لشىء كهذا أن يتمخض عن نظام من معادلات بسيطة محددة؟

تساءل رويل وتاكنز عن إمكانية وجود جاذب من نوع آخر تكون له مجموعة الخصائص المناسبة: مستقر ليمثل الحالة النهائية لنظام ديناميكي، وفى نفس الوقت لا يستقر على حالة ثبات، أى لادوري، فهو لا يكرر نفسه على الإطلاق. من الوجهة الهندسية كان السؤال لغزا: لكى يمثل كافة الاهتزازات، فإن المسار يكون عبارة عن خط لانهائى الطول، ولكن محصور فى مساحة محدودة. لم تكن الإجابة قد وضع لها المصطلح المناسب بعد، إن الجاذب هو فى الواقع **شكل فراكتلى.**

عن طريق المنطق الرياضي، انتهى رويل وتاكينز إلى أن شيئا كهذا يجب أن يكون موجودا، إنهم لم يروه بعد، ولم يقوموا برسمه، ولكن البرهان كان كافيا. ويتذكر رويل كيف قُوبلَت هذه الأفكار فى مؤتمر علمى فى وارسو: "كان رد الفعل يتسم بالبرود، بل لقد اعتبر الكثيرون من الفيزيائيين أن فكرة طيف متصل مصحوب بعدد محدود من درجات الحرية نوعا من الهرطقة." ولكن الفيزيائيين، عدد قليل منهم فى الواقع، قد فهموا مضامين بحث عام ١٩٧١، وبدؤوا العمل على ضوئه.

■ ■ ■

فى عام ١٩٧١، كانت الكتابات العلمية تحتوى فى الواقع رسماً تخطيطياً لمثل هذا الكائن الخرافى الذى يريد رويل وتاكنز بث الحياة فيه، كان **إدوارد لورنز** قد ألحقه

ببحثه لعام ١٩٦٣ عن (العشوائية التحديدية)[vii]، صورة تحتوى فقط على منحنيين إلى اليمين، واحد داخل الآخر، وخمس لليسار. لرسم هذه المنحنيات السبعة تطلّب الأمر القيام بخمسة آلاف عملية حساب متتالية على الحاسوب. إن نقطة تسير على هذا المنحنى فى فضاء الطور تمثل الدوران الهيولى البطيء لتيارات الحمل التى مثلها لورنز بمعادلاته الثلاث. ولما كان هذا النظام له ثلاثة متغيرات، فإن فضاء الطور يكون ثلاثى الأبعاد. ورغم أن لورنز لم يرسم إلا جزءا منه، إلا أنه رأى أكثر مما رسم، نوع من لولب مزدوج، أشبه بجناحى فراشة، ملتفان بتعقيد غاية فى الروعة. وحين تدفع الحرارة السائل ليتحرك فى اتجاه معين، يستقر المسار على الجناح الأيمن مثلا، وحينما ينعكس ليدور فى الاتجاه الآخر، يكون المسار على الجناح الأيسر.

كان الجاذب مستقرا، قليل الأبعاد، غير دوري. إنه لا يتقاطع مع نفسه أبدا، لأنه لو فعل، وعاد النظام لنقطة سابقة، فإنه سوف يدور حول المنحنى الذى قُفل، وستكون الحركة دورية. إن هذا لا يحدث أبداً، وفى هذا يكمن سر جمال الجاذَب. كل هذه اللوالب تمتد إلى عمق لانهائى، لا يتصل بعضها ببعض أبدا، ولا تتقاطع أبدا، ولكنها فى نفس الوقت محتواة فى حيز محدود على شكل الصندوق. كيف لعدد لانهائى من المسارات أن تُحتوى فى حيز محدود؟

قبل أن تغمر أشكال ماندلبروت السوق العلمي، كانت تفاصيل مثل هذا الشكل أصعب من أن تُتصور، وأدرك لورنز "تعارضا ظاهريا" فى وصفه المبدئي، وقد كتب: "كان من الصعب التوفيق بين تداخل سطحين، كل يحتوى على لولب من اللولبين، مع حقيقة استحالة تقاطع المسارات" ولكنه رأى أن الإجابة أكبر من أن تظهر من خلال العدد المحدود من الحسابات التى قام بها. لقد أدرك أن النقاط التى يبدو فيها تقاطع للمسارات، فإنها تكون فى الواقع على مستويات مختلفة فى الفراغ، ومن ثم فهى غير متقاطعة. ولذلك فإنه لا عجب ألا يعبأ علماء الطبيعة الجوية ببحث لورنز، ولا أن يصاب رويل بعد عِقْد من الزمان بالدهشة والإعجاب حين علم به. وقد ذهب لزيارته بعد ذلك، وكانت زيارة ودية أسف رويل أنها لم تكن أطول.

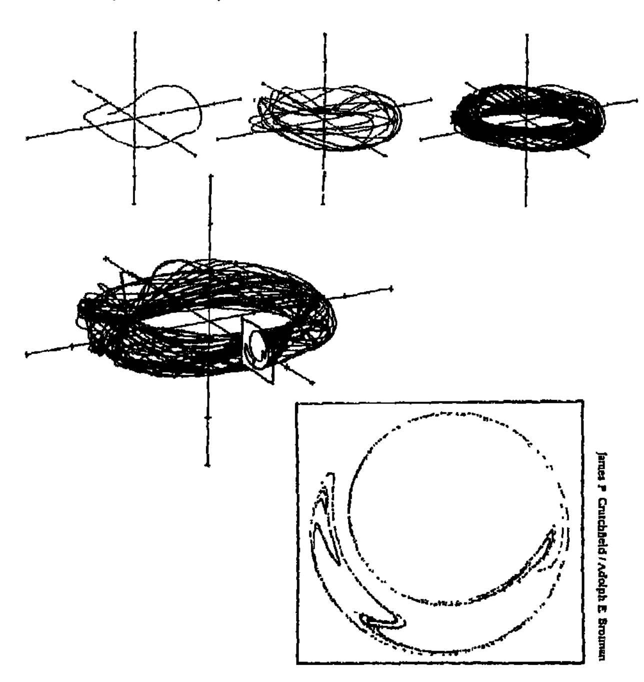
شكل ٤-٥ أول جاذب غريب: فى عام ١٩٦٣ تمكّن إدوارد لورنز من إجراء حسابات لبعض الطيّات الأولى لنظامه المكوّن من ثلاثة معادلات بسيطة. ولكنه كان يحس بأن هذين الجناحين اللولبيين يجب أن يكونا هيكلا غير عادي. [ملحوظتان من المترجم: ١- الجاذب شكل فراغي، أى ذو ثلاثة أبعاد، ولذا فإن التقاطعات البادية فى الشكل غير حقيقية، فخطوط الجاذب لا تتقاطع أبدا. ٢-لأن الشكل فراغى (ثلاثى الأبعاد)، فإنه مبيّن فى الشكل بطريقة الإسقاط المعروفة فى الرسم الهندسى للأشكال الفراغية. يسمى الشكل العلوى المسقط الرأسي، والسفلى بالمسقط الأفقي، وهو نفس الشكل المعبر عن حالة الهيولية الذى ورد فى الفصل الأول شكل ١-٤، وفى الفصل الثانى، شكل ٢ - ١، الحالة الرابعة.]

اتخذت المجهودات لتتبع التلميحات التى أشار إليها بحث رويل وتاكنز مسارين. الأول كان صراعاً نظريا لتصور الجاذب، هل **جاذب لورنز** يُعتبر نمطيا؟ ما هى الأشكال الأخرى الممكنة؟ والثانى كان تجريبيا بهدف إثبات أو نفى القفزة غير المدعّمة رياضيا الهادفة إلى إمكانية تطبيق الجاذب على النظم الهيولية فى الطبيعة.

فى اليابان، قادت الأبحاث فى الدوائر الكهربية - التى هى أسرع بمراحل من النظم الميكانيكية - بـ **يوشيسوك أيدا** Yoshisuke Ueda إلى وضع عدد من الجاذبات العجيبة. (وقد قابل نفس التحية الباردة التى قوبل بها رويل). وفى ألمانيا، بدأ **أوتو روسلر** Otto Rössler الطبيب فى رؤية الجاذبات العجيبة كأشكال فلسفية، مخلّفا الجانب الرياضى وراءه. وقد ارتبط اسمه بجاذب بسيط على شكل شريط مطوي، درسه بسبب بساطته، ولكنه كان يستطيع تصوّر ما هو أكثر أبعادا؛ "إصبع من السجق داخل آخر داخل آخر، أخرجه، اطوه، اضغطه، ثم أعده لمكانه." إن الطى والضغط هما فى الواقع مفتاح تكوين الجاذبات العجيبة، وربما كانا المفتاح لديناميكا النظم الواقعية التى تسببت فى وجودها. وقد شعر بأن هذه الأشكال تتضمن مبدأ للتنظيم الذاتى فى العالم الواقعى.

ليس عمل صور للجاذبات العجيبة بالأمر الهيّن على الذهن، فالمسارات تتداخل فى تعقيدات لانهائية بحسب عدد الأبعاد، منتجة مناطق مظلمة وهياكل داخلية لا يمكن أن تُرى من الخارج. ولتصوير شكل ذى ثلاثة أبعاد على ورقة مسطّحة استخدم العلماء فى البداية فكرة الإسقاط المعروفة لدى المهندسين. ولكن مع زيادة الأبعاد فإن الإسقاط يصبح بلا جدوى، فلجأ العلماء إلى فكرة "**خريطة الإعادة**[viii] "return map" أو **خريطة بوانكريه** "Poincaré map" العبقرية، والتى تقوم فكرتها على أخذ شريحة من قلب الجاذب المتشابك، بالضبط كما يأخذ الجرّاح عينة من أحد الأنسجة.

تزيل خريطة بوانكريه بعدا من الجاذب، وتحيل الخط المتصل إلى نقاط منفصلة. وفى تحويل جاذب إلى خريطة بوانكريه المقابلة له، يعتمد الباحث على قدرته فى التقاط أكثر النقاط أهمية، وهو فى سبيله لذلك لا يفتأ يتصور الجاذب حيا مليئا بالحركة فى ذهنه، بينما مساراته تتحرك فى كافة الاتجاهات أمام عينيه على شاشة الحاسوب.



شكل ٥-٥ إظهار هيكل الجاذب: الجاذب الغريب المبين بأعلى الصورة، بداية مسار واحد، ثم عشرة فمائة، تبين التصرف الهيولى لبندول يدفع على فترات منتظمة. عندما يصل عدد المسارات إلى عدة آلاف، يصبح هيكل الجاذب مستحيل التصور.

لبيان التركيب الداخلى، يمكن للحاسوب أن يصنع شريحة مقطعية فى منطقة منه، تسمى "مقطع بوانكريه Poincare section". هذا الأسلوب يحيل الشكل ذا الثلاثة أبعاد إلى شكل ذى بعدين، وفى كل مرة يعبر الجاذب الشريحة، فإن نقطة تُوقَّع على الرسم. وبالتدريج يتضح الشكل أكثر فأكثر. المثال المعطى له أكثر من ثمانية آلاف نقطة، كل نقطة تمثل مسارا كاملا حول الجاذب. النتيجة هى أخذ عينات على فترات منتظمة، فإذا فقدت بعض المعلومات، فإن غيرها تعوض هذا الفقد.

يشبه تكنيك خريطة بوانكريه أخذ عيّنات من النظام بدلاً من تصويره كمتصل. ويكون لدى الباحث بعض المرونة فى اختيار أماكن أخذ العينة، بتحديد أكثر النقاط أهمية وثراء فى معلومات النظام. فقد تكون بالنسبة للبندول المتأرجح هى النقطة السفلى، حيث تكون السرعة فى أقصى قيمتها. أو قد يختار الباحث فترات متساوية ويرصد نقاط النظام عندها. وعلى أى من الطريقتين، فإن الصورة الناتجة سوف تعبر عن الهيكل الفراكتلى الذى تصوره إدوارد لورنز.

■ ■ ■

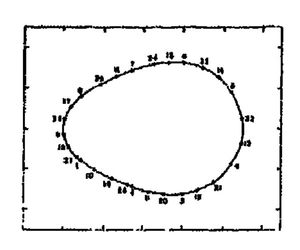
حينما جاء دافيد رويل إلى معمل جولب وسويني، عام ١٩٧٤، وجد الفيزيائيون الثلاثة أنفسهم فى موقع حسّاس بين النظرية والتجربة. قطعة من الرياضيات، راسخة فلسفيا، ولكنها من الوجهة الفنية غير مؤكدة. اسطوانة من سائل مضطرب، ليس فيه ما يغرى بالنظر، ولكنه يبين تماما أنه غير متفق مع النظرية القديمة. يتحادث الرجال، ثم ينصرف كل لشأنه، لم يروا جاذبا عجيبا، ولم يجروا قياسات كثيرة عن حالة بدء الاضطراب، ولكنهم يعلمون أن لاندو على خطأ، ويتوقعون أن يكون رويل على صواب.

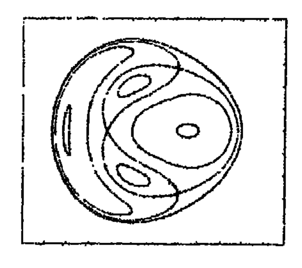
وكعنصر من عناصر العالم كشف عنه الحاسوب، بدأ الجاذب العجيب كمجرد احتمال، مشيراً لمكان فشل الكثيرون من أصحاب الخيال القوى فى القرن العشرين أن يتجهوا إليه. ثم سرعان-حينما رأى العلماء ما أظهره الحاسوب- بدا وكأنه وجه كانوا يرونه فى كل مكان، فى موسيقى التدفق المضطرب، وفى السحاب المنتشر كالغلالة عبر السماء. إن الطبيعة مقيدة، فالاضطراب يبدو وكأنه مرتبط بأشكال ذات مضامين مشتركة.

■ ■ ■

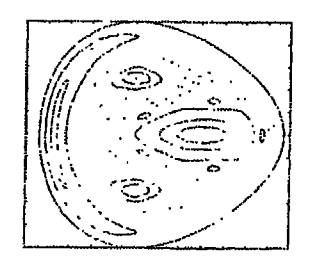
وقد جاء أشهر جاذب عجيب، وذلك بسبب أنه كان الأبسط، من شخص لا علاقة له لا بالاضطرابات ولا بديناميكا الموائع، بل كان فلكياً يدعى **ميشيل هينون** Michel Hénon من مرصد نيس. ويرجع الفضل للنُّظم الفلكية فى إعطاء الدفعة الأولى لدراسة النظم

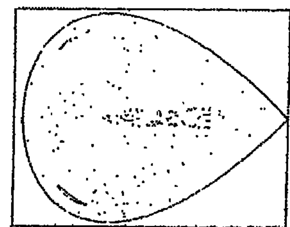
الديناميكية، فحركات الكواكب المنضبطة كالساعة هى التى أعطت نيوتن شهرته، ولابلاس إلهاماته. ولكن ميكانيكا السماوات تختلف عن مثيلتها فى الأرض من وجهة نظر جوهرية. فالنظم الأرضية تفقد طاقتها بسبب الاحتكاك، فهى نظم **"مشتتة للطاقة"**، بينما لا تكون النظم الفلكية كذلك، إنها نظم **"محافظة على الطاقة"**. فى الواقع، على المستوى الضئيل فإن هذه النظم تعانى أيضا من التباطؤ، بسبب إشعاع الطاقة والتجاذب فيما بينها. ولكن الاعتبارات العملية تقتضى أن يتجاهل الفلكيون هذا القدر من التشتت، وعندئذ لن يعانى فضاء الطور انكماشا أو طياً على الوجه المطلوب لإنتاج طبقات (فراكتالية). لا يمكن للجاذب العجيب أن ينشأ٩، فهل يمكن ذلك للهيولية؟



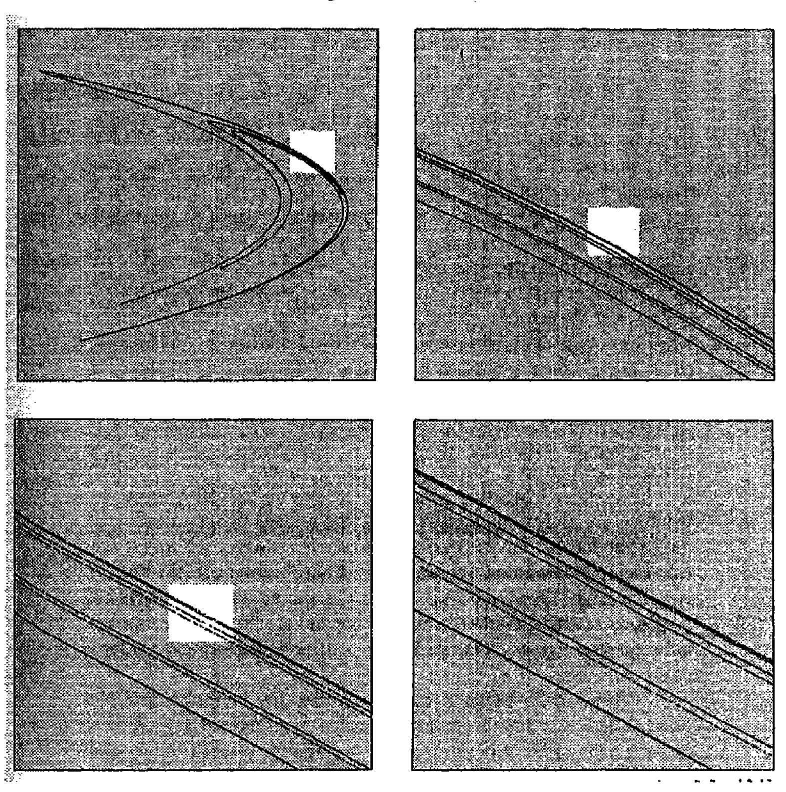


شكل ٥-٦ مسارات حول مركز مجرى، لفهم مسارات الكواكب خلال المجّرات، حسب ميشيل هينون تقاطعات مسار ما مع مستوى معين. يعتمد النمط النهائى على الطاقة الكلية للنظام. النقاط المتعلقة بنظام مستقر ترسم بالتدريج منحنى متصلاً (يسار)، بينما تعطى مستويات أخرى للطاقة مزيجا من الاتزان والهيولية، ممثلة بمناطق من نقاط مبعثرة.





لقد حقق الكثيرون من الفلكيين شهرة ومستقبلا باهرا دون أن يشغلوا بالهم بالنظم الديناميكية بالمرة، ولكن هينون كان مختلفا. لقد ولد فى باريس عام ١٩٣١، أصغر قليلا من لورنز ولكنه كان على شاكلته، عالما له شغف لا يعرف الشبع بالرياضيات. كان يحب منها المسائل الصغيرة المحددة، والتى تقتضى التعامل مع الفيزياء، "وليس على شاكلة ما يفعله الناس هذه الأيام" على حد قوله. وحين هبط الحاسوب لمستوى الهواة، اقتنى واحدا من الطراز الذى يمكن اقتناؤه منزليا. على أنه قبل ذلك بوقت طويل، كان قد انشغل بمسألة محيِّرة بصورة خاصة فى الديناميكا، بالتجمع النجمي، ملايين النجوم تتجمع فى منطقة ما، وهى من أهم ما يخلب اللب عند النظر للسماء ليلا. إن مثل هذا التجمع كثيف للغاية بالنجوم. وقد حيّر العلماء طويلا كيف تظل باقية مع بعضها البعض، وكيف يتطور الموقف بينها مع الزمن.



شكل ٥-٧ جاذب هينون: إن المزج البسيط بين الطى والمط يعطى جاذبا سهل الحساب ولكن لا يزال صعب الفهم على الرياضيين. بينما تظهر آلاف، ثم ملايين من

النقاط، تتضح التفاصيل أكثر. فما يبدو مستقيماً بسيطاً يتضح عند التكبير أنه مزدوج، ثم مزدوجاً مضاعفاً، ومع ذلك فإن نقطتين متتابعتين سوف يظلاّن متجاورتين أمر يتباعدان على مر الزمن فأمر من غير الممكن التنبؤ به.

من وجهة النظر الديناميكية، يمثل التجمع النجمى مسألة تحتوى على أجسام متعددة. وكان **نيوتن** قد حل المسألة المحتوية على جسمين، كالأرض والقمر، فكل جسم منهما يدور فى مسار إهليلجى حول مركز ثقل المجموعة. ولكن حين يضاف جسم ثالث للمجموعة، يتغير كل شيء. إذ تصبح المسألة مستعصية على الحل تماما. يمكن حساب المسار رقميا إلى مدى معين، وباستخدام أقوى الحواسب يمكن تتبعها لمدة ما قبل أن يفقد الحساب الدقيق أثره. أما حل المسألة رياضيا ، بمعنى الوصول إلى حل شامل للمسألة، فأمر مستحيل. هل النظام الشمسى مُستقّر؟ إنه بالقطع يبدو كذلك، على المدى القصير، ولكن حتي اليوم لا يعلم أحد يقينا أن مدار كوكب ما لن يصبح منحرفا بصورة مطّردة إلى أن يفُقد للأبد.

إن نظاما كالتجمع النجمى من التعقيد بحيث لا يمكن معاملته معاملة مباشرة كمسألة متعددة الأجسام. ولكن جانبه الديناميكى يمكن أن يدرس بمساعدة بعض التجاوزات. من المعقول مثلا أن نعتبر الأجسام تشق طريقها عبر مجال تجاذبى ذى مركز مشترك. وأنه يحدث كثيرا أن يقترب نجمان من بعضهما البعض بدرجة تسمح بمعاملتهما كنظام مستقل. وقد أدرك العلماء أن التجمع النجمى لا يمكن أن يكون مستقرا. فالنجوم تميل إلى أن تتجمع فى أزواج، وحين ينضم للازدواج نجم ثالث، فإن نجما من الثلاثة يتعرض لدفعة قوية تقذف به خارج التجمع النجمى كلية١٠، وبالتالى تتضامّ النجوم الباقية قليلا. حين أخذ هينون هذه المسألة كرسالة للدكتوراه عام ١٩٦٠، وضع افتراضا اجتهاديا إلى حد ما؛ أن التجمع حين يقل فى حجمه، يحافظ على تماثله الذاتي. وحين أجرى حساباته، توصلّ إلى نتيجة مدهشة، سوف ينهار قلب التجمع على نفسه، مكتسبا طاقة حركة، ومتجها إلى حالة لانهائية من الكثافة. كان هذا صعب التصور، والأهم من ذلك أنه غير مؤيّد بشواهد التجمعات النجمية التى رصدت إلى الآن. ولكن نظرية هينون، والتى أخذت فيما بعد اسم "***الانهيار التجاذبى الحرارى*** gravothermal collapse"، تملّكت الزمام بعد حين.

ثم بدأ يعمل على مشكلة أبسط فى موضوع ديناميكا النجوم. فى هذا الوقت، عام ١٩٦٢، وخلال زيارته لجامعة برنستون، أتيح له استخدام الحاسوب، بالضبط كما أتيح للورنز استخدامه فى مسائل الطبيعة الجوية. بدأ هينون يضع نماذج لمسارات النجوم حول مركز مجراتها. وبنوع من التبسيط يمكن تشبيه ذلك بمسار الكواكب حول الشمس، مع اختلاف واحد، لا يكون مصدر الجاذبية المركزية نقطة، بل قرصا ثلاثى الأبعاد.

وأجرى بعض التبسيطات على المعادلات التفاضلية، عبر عنها بقوله "لكى نحصل على حرية أكبر فى الاختبارات، تجاهلنا مؤقتا الأصل الفلكى للمشكلة." وقد كان يعنى بحرية الاختبارات، وإن لم يصرح بذلك فى حينه، إمكانية التعامل مع الحاسوب، حتى وإن كان بدائياً بمقاييس أجهزتنا اليوم. فجهازه كان ذا ذاكرة سعتها جزء من ألف جزء مما للحاسبات بعد خمس وعشرين سنة، وسرعة أبطأ بكثير عنها. ولكن كما حدث فى تجارب الهيولية التى تمت فيما بعد، وجد هينون أن للتبسيط فوائده. فبتجريد نظامه توصل إلى نتائج قابلة للتطبيق فى نظم أخرى أيضا، وهى أنظمة أهم أيضا. على أنه بعد وقت كانت المسارات المجرية لا تزال لعبة نظرية، ولكن ديناميكية مثل هذه النظم كانت تحت دراسة مستفيضة بواسطة المهتمين بمسارات الجسيمات الأولية فى المعجّلات فائقة الطاقة، والمهتمين بتكثيف مغناطيسية البلازما لإنتاج الاندماج النووى.

تكون لمسارات النجوم فى المجرات، على مدى زمنى يبلغ حوالى ٢٠٠ مليون عام، ثلاثة أبعاد بدلا من أن تكون شكلا إهليلجيا خالصا. والمسارات ثلاثية الأبعاد أصعب فى التصوّر الذهني، كما هو الحال حينما يتصور فضاؤها الطوري. ومن ثم فقد استخدم هينون تكنيكا يماثل خريطة بوانكريه. لقد تخيل صحيفة رأسية واقعة فى جانب من جوانب المجرة، يخترقها كل مسار من المسارات، كما تجتاز الجياد خط النهاية، ثم يسجل نقطة التقاء المسار بالصحيفة، ويراقب هذه النقاط مسارا بعد الآخر.

كان على هينون فى البداية أن يرسم هذه النقاط يدوياً، ولكن بعد حين بدأ ككثير من العلماء المطبِّقين لهذا التكنيك فى رؤيتها على شاشة الحاسوب. وكما تقترب مصابيح إضاءة الشوارع واحدا وراء الآخر، كانت نقاط المسارات التقليدية تظهر كنقطة فى أقصى اليسار السفلى من الصحيفة، ثم فى الدورة التالية تظهر نقطة أعلى لليمين قليلا، ثم أخرى فأخرى، أكثر علوا وانحرافا لليمين، وهكذا. فى البداية يكون الشكل واضحا، ولكن بعد عشر أو عشرين نقطة يظهر منحنى على شكل بيضة، ثم تصنع النقاط الأخرى دوائر حول الشكل، وبعد مئات أو آلاف من الدورات يكون الشكل قد تحدد بصورة قاطعة.

مثل هذه المسارات ليست منتظمة تماماً، حيث إنها لا تكرر نفسها بالضبط أبدا، ولكنها بالتأكيد قابلة للتوقع، فهى بذلك أبعد عن أن تكون هيولية. إلى هذا الحين كان يسجّل ما كان مأخوذا كقضية مسلم بها، المسارات دورية. لقد قامت أجيال من الفلكيين برصد وحساب المئات من هذه المسارات على مدى السنين، ولكن اهتمامهم كان منصبا فقط على الدورى منها. ويقول هينون: "أنا أيضا كنت مقتنعا بأن المسارات

يجب أن تكون منتظمة". ولكنه مع مساعده كارل هيلس Carl Heiles استمرا فى الحسابات، مزيدين الطاقة تدريجيا فى نظامهم التجريدي، وسرعان ما شاهدا شيئا جديدا تماما.

فى البداية أخذت البيضة تتلوى إلى شكل أكثر تعقيداً، متقاطعة مع نفسها فى أشكال تشبه رقم ?ومنقسمة إلى منحنيات منفصلة، ولكن مع بقاء كل مسار داخل منحناه. ثم مع الاستمرار فى زيادة الطاقة، حدث تغير فجائي. يقول هينون وتلميذه: "هنا كانت المفاجأة." بعض المسارات أصبحت غير مستقرة لدرجة أن النقاط بدت مبعثرة على الورقة. فى بعض المواضع كانت المنحنيات لا تزال ترسم، وفى غيرها لا تُمثل النقاط أية منحنيات. كانت الصورة درامية للغاية، مظاهر للفوضى الكاملة ممزوجة ببقايا لا تنكرها العين من النظام، تلوح للفلكيين كجزر وسلاسل من جزر. لم يكن أمامهما إلا الاستكشاف وتصور الاحتمالات. وتأسيساً فقط على تجاربهم الرقمية، وضعا تخمينا حول الهيكل العميق لمثل هذه الصورة. لقد خمّنا أنه مع المزيد من التكبير ستظهر المزيد والمزيد من الجزر أصغر وأصغر، ربما إلى مالا نهاية. كان البرهان الرياضى مطلوبا، ولكن الأمر لم يكن هيناً.

وانصرف هينون إلى مسائل أخرى، ولكن بعد أربعة عشر عاماً، حين سمع عن الجاذب العجيب لدافيد رويل وإدوارد لورنز، كان مستعدا لأن ينصت. فبحلول ١٩٧٦ كان قد انتقل إلى مرصد نيس، حيث سمع محاضرة عن جاذب لورنز. كان الفيزيائى المحاضر يحاول أساليب مختلفة لإظهار التركيب الدقيق للجاذب، ولكن دون نجاح كبير. ورغم أن النظم المشتتة للطاقة ليست تخصص هينون (أحيانا يبدى الفلكيون خوفا من هذه النظم، فهى غير مهندمة)، إلا أن فكرة واتته.

مرة أخرى، قرر أن يلقى جانبا كل مرجعية للأصول الفيزيائية، والتركيز فقط على المضمون الهندسى لما يريد أن يستكشفه. فى حين انحصرت أعمال لورنز والآخرين فى المعادلات التفاضلية التى تمثل التغيرات المستمرة فى الفضاء وفى الزمن، اتجه هو إلى **معادلات الفروق** difference equations، حيث الزمن غير متصل، بل محدد بفترات. كان يعتقد أن الأساس يكمن فى تكرار الطى والمط لفضاء الطور، على الصورة التى يصنع بها صانع الفطائر فطائره، حيث ينتهى إلى كومة من الطبقات الرقيقة. رسم هينون شكلا بيضاويا على ورقة، ولكى يمطه، اختار معادلة رقمية قصيرة يمكنها أن تنقل كل نقطة على البيضاوى إلى نقطة أخرى على شكل ممطوط لأعلى عند المنتصف، على هيئة قوس. تسمى هذه العملية رياضيا "**تطبيق** mapping"، فالشكل البيضاوى

بأكمله قد تم تطبيقه إلى قوس. ثم اختارا تطبيقا آخر، فى هذه الحالة يؤدى إلى انكماش القوس للداخل ليجعله أقل عرضا. ثم تطبيق آخر يدير القوس الضيق من أحد جانبيه، بحيث يتماشى بدقة مع البيضاوى الأول. التطبيقات الثلاثة يمكن أن تجتمع فى معادلة واحدة لغرض الحسابات.

كانت روح العملية تتبع **حدوة سميل**. ومن الناحية الرقمية فالعملية من السهولة بحيث يمكن أن تجرى حساباتها بآلة حاسبة. كل نقطة لها إحداثيان، السينى والصادي. فلإيجاد الإحداثى السينى الجديد، القاعدة أن تضيف واحدا إلى قيمة الإحداثى الصادى السابق، ثم تطرح مربع قيمة الإحداثى السينى مضروبا فى ١,٤ ، ولإيجاد الإحداثى الصادى الجديد، اضرب الإحداثى السينى فى ٠,٣ بمعنى آخر:

س جديد = ص + ١ − ١,٤ س^{٢}

ص جديد = ٠,٣ س.

اختار هينون نقطة اعتباطية، وبدأ يجرى الحسابات حتى وصلت ألفا، ثم استخدم حاسوبا حقيقيا، ثم وصل بالحسابات سريعا إلى مليون.

فى البداية ظهرت النقاط تتبعثر عشوائيا على الشاشة، وهو فى الواقع عبارة عن وقع شرائح بوانكريه للجاذب ثلاثى الأبعاد تُسجِّل على الشاشة هنا وهناك، لم تتخذ شكلا واضحا بعد، ثم سرعان ما بدأت ملامح الشكل تظهر، خطوط عامة لشكل يشبه الموزة. وكلما استمر البرنامج فى العمل، ظهرت تفاصيل أكثر، فبعض الملامح العامة بدت وكأنها تتخذ سُمكا، ولكن هذا السمك لا يلبث أن يتحلل إلى خطين، ثم ينقسم الخطان إلى أربعة، زوج هنا وزوج على البعد. ومع زيادة التكبير يتضح أن الخطوط الأربعة هى فى الواقع أربعة من أزواج الخطوط، وهكذا، إلى مالا نهاية. وكمثل جاذب لورنز، لقد أظهر جاذب هينون تراجعا مستمرا، أشبه بلعبة الدمى الروسية المتداخلة، ولكن بلا نهاية.

ويمكن للتداخل بين الخطوط أن يرى فى شكله النهائى من مجموعة من الصور تتدرج فى درجة تكبيرها. ولكن التأثير العجيب لهذا **الجاذب الغريب** يمكن أن يُفهم بطريق آخر، حينما يتولّد الشكل مع الزمن، نقطة بعد نقطة. إنه يكون كشبح يظهر فى الضباب، نقاط جديدة تتبعثر عشوائيا، لا تنبئ بانتسابها لأى شكل كان، ناهيك عن شكل غاية فى الدقة معقد التفاصيل. نقطتان متتابعتان تبدوان على بُعد من بعضهما البعض، كمثل نقطتين فى تدفق مضطرب كانتا متجاورتين فى البداية. من المستحيل أن تتوقع موقع أية نقطة تالية، عدا بالطبع أنها لا بد محتواة فى الجاذب.

النقاط تتبعثر عشوائيا، والشكل يظهر أثيريا، لدرجة أنه من السهل أن يُنسى أنه شكل للجاذب. إنه ليس مجرد خط بيانى لنظام ديناميكي، بل هو الخط البيانى الذى تنتهى إليه كافة الخطوط البيانية. لهذا ليست النقطة الابتدائية بذات قيمة على الإطلاق. فطالما أن نقطة البدء تقع قريبة بدرجة ما من الجاذب، فإن النقاط سريعا ما تتضامّ إليه.

■ ■ ■

فيما بعد، غذى التعرف على الجاذبات العجيبة ثورة الهيولية بأن أعطى المحللين الرقميين برامج محددة ينفذونها. إنهم يبحثون عن هذه الجاذبات فى كل مكان، حيث يبدو وكأن الطبيعة تتصرف عشوائيا. جادل كثيرون أن طقس الكرة الأرضية يتبع جاذباً عجيبا، وجمع آخرون ملايين من أسعار أسواق السلع ليبحثوا عن جاذب عجيب، يرقبون العشوائية من خلال أجهزة الحاسوب طيعة التحكم.

فى منتصف السبعينات كان اكتشاف هذه الأمور لا يزال متروكا للمستقبل. لم يرَ أحد حقيقة جاذبا عجيبا فى تجربة، وكان من أبعد الأمور وضوحا كيف الطريق لرؤية واحد منها. نظريا يمكن للجاذب العجيب أن يعطى مادة رياضية لأساسيات الخواص الهيولية الوليدة، أحدها الحساسية المرهفة للظروف الأولية. وكان **الخلط** mixing هو الخاصية الثانية، بمعنى أكثر وضوحا لمصمِّم محرك نفاث مثلا، مهتم بأكفأ نسبة خلط بين الوقود والأكسوجين. ولكن لم يكن يعلم أحد كيف يقيس هذه الخواص، أن يحدد لها قيما رقمية. كما بدت الجاذبات العجيبة منتمية لأشكال ماندلبروت الفراكتلية، مما يعنى أن أبعادها كسرية، ولكن لم يكن أحد يعلم كيف يقيس هذه الأبعاد، أو كيف يطبق مثل هذه القياسات على مشكلة هندسية.

والأهم من ذلك، لم يكن أحد يعلم ما إذا كانت الجاذبات العجيبة سوف تقول شيئا عن أعقد مشاكل النظم اللاخطية. فعلى عكس النظم الخطية؛ سهلة الحل والتصنيف، لا تزال النظم اللاخطية، فى مضمونها، بعيدة عن التصنيف، كل نظام بعيد كل البعد عن الآخر. ربما يبدأ العلماء فى احتمال وجود خواص مشتركة، ولكن حينما يحين وقت إجراء الحسابات والقياسات، يتضح أن كل نظام عالم قائم بذاته، ففهم نظام لا يغنى شيئا فى فهم النظام الآخر. إن جاذبا مثل جاذب لورنز يبين الاتزان والهيكل الداخلى لنظام كان يُظن ألا نمط له، ولكن كيف يساعد هذا اللولب المزدوج الباحثين فى نظم لا علاقة لها به. لا أحد يعرف.

إلى الآن، تجاوزت الإثارة العلم الخالص، فالعلماء الذين شهدوا هذه الأشكال سمحوا لأنفسهم أن ينسوا مؤقتا قواعد الخطاب العلمي، رويل مثلا قال: "إنني لم أتحدث عن السحر الجمالي للجاذبات العجيبة، هذه النظم من المنحنيات، هذه السحب من النقاط، توحي أحيانا بالألعاب النارية أو بالمجرات، وأحيانا تفرعات نباتية. إن عالَما يكمن في هذه الأشكال ينتظر الاستكشاف، وتآلفا هارمونيا ينتظر من يكشف عنه".

---

i لفظ "مائع" اسم جامع لكل من السوائل والغازات. المترجم

ii عالم فيزيائي وضع نظرية الكوارك–المترجم

iii صمم هذه التجربة العالم الفرنسي م. **كوييت** M. M. Couette في مطلع القرن، وزاد العالم البريطاني **جوفري تايلور** Geoffrey Taylor من سرعتها عام ١٩٢٣ وشاهد أشكال رصّة الكعك المذكورة، ويُعتبر عمل سويني وجولوب تطويرا لهذا المسار التجريبي. المترجم

iv كانت نقطة الضعف دائما في كافة التجارب التي تجرى على السوائل هي كيفية قياس سرعتها، إذ كان يستخدم لذلك مجسات توضع في طريق السائل، فتؤثر على السرعة المراد قياسها، وقد تغلّب سويني وجولوب على هذه الصعوبة بنثر قطع دقيقة للغاية من الألومونيوم في السائل ينعكس عليها ضوء الليزر. المترجم

v منذ أن وضع بوانكريه فكرة فضاء الطور، والمشاهَد أن مسارات النظم الديناميكية المستقرة فيه لا تخرج عن ثلاثة، بحسب تصرف النظام، فمن النظم ما يستقر على حالة ثبات، وهنا يقال إن فضاء الطور به "جاذب" ذو نقطة ثابتة fixed point attractor، وما ينتهي إلى حالة من الدورية يقال إن فضاء الطور له ذا جاذب ذي دورة محدودة limit cycle attractor، كما أن هناك حالة ثالثة يكون الاستقرار فيها على صورة معقدة، ويطلق عليها حالة **شبه الدورية** quasiperiodic، والجاذب فيها يكون معقدا (يأخذ شكل طارة (tourus)، ولكن المسارات في فضاء الطور لا تستقر على حالة معينة، بل هي دائمة التقارب والتباعد، ولكنها في نفس الوقت لا تتجاوز منطقة معينة من فضاء الطور، وهو ما يميزها عن حالة العشوائية أو النظم غير المستقرة، الأمر الذي أدى بتاكنز وروِل إلى وضع مصطلح الجاذب الغريب (أو العجيب). المترجم

vi الواقع أنها ثلاثة أنواع كما ذكرنا في الهامش السابق، يرجع في ذلك إلى Chaos Thoery tamed الموجود في قائمة المراجع المذكورة بالكتاب. المترجم

vii الاسم الذي كان يطلق على حالة الهيولية قبل أن يوضع لها الاصطلاح الخاص بها. المترجم

viii انظر قاموس المصطلحات للتعرف على هذا المصطلح والمزيد من الشرح حول تطبيق هذا الأسلوب. المترجم

ix يجدر التنويه بأن الجاذبات الغريبة تظهر فقط في النظم التشتتية (انظر قاموس المصطلحات). المترجم

x تعرف هذه الظاهرة فلكيا بظاهرة "**المقلاع** slingshot"– المترجم



العمومية

على بعد عدة ياردات من المسقط المائى، وقف **ميشيل فايجنباوم** يتطلع إلى التيار يمشى متهاديا قبل أن يتسارع فى تموّجات متلاطمة ترغى وتزبد. وقف ينفث دخان لفافته مستغرقا فى التفكير، ثم حدّث نفسه قائلا: "بإمكانك التركيز على بقعة ما، أو تحريك رأسك بسرعة محاولا التقاط المنظر بأكمله، فتشعر به يسرى فى أحشائك، ولكن لو كان لديك خلفية رياضية، فسوف يغلبك الإحساس بالجهل".

النظام فى اللانظام: هذه أقدم عبارة نمطية فى تاريخ العلم البشري. ففكرة وجود وحدة مكنونة أو شكل بدائى وراء كافة صور الطبيعة هى فكرة جذابة، وكان لها أثر بالغ فى إلهام أنصاف العلماء والمهوّسين. حينما جاء ميشيل فايجنباوم إلى لوس ألاموس، عام ١٩٧٤، بعد أقل من عام من عيد ميلاده الثلاثين، كان يعلم أن الفيزيائيين لو كانوا بصدد فعل شيء الآن، فإنه يلزمهم إطار عملي، طريقة لتحويل أفكارهم إلى حسابات، ولم يكن واضحا بالمرة كيف يقومون بأول خطوة فى اتجاه المشكلة.

حين ترأس بيتر كاوثرز Peter Carruthers، عام ١٩٧٣ القسم النظرى بلاس ألاموس، عقد العزم على تجديد دمه بالنابغين من الباحثين الشبان. كان عالى الطموح، ولكنه كان يعلم من خبرته أن الفتوحات العلمية لا يمكن أن يخطط لها مسبقا.

"لو أنك شكّلت لجنة فى معمل وقلت: "علينا أن نفهم مشكلة الاضطرابات، فإن عدم فهمنا لها يقف عقبة فى سبيل التقدم فى مجالات كثيرة"، واشتريت الأجهزة المتطورة، والحاسبات فائقة القدرة، فقد تجد نفسك فى النهاية لم تصل إلى شيء ذى قيمة. إننا بدلا من ذلك قد وظفنا هذا الإنسان النابغ، يعمل أغلب وقته فى هدوء وصمت". لقد تحدّثا عن الاضطرابات، ولكن وصل الأمر إلى أنه حتى كاوثرز لم يكن يعلم وجهة فايجنباوم. "كنت أعتقد أنه قد هجر المشكلة إلى شيء آخر. لم أكن أعلم أن هذا الشيء الآخر هو نفس المشكلة. لقد ظهر أنه الموضوع الذى يقف عقبة فى سبيل مجالات كثيرة، التصرفات اللاخطية للنظم. لم يكن أحد يعلم إلى هذا الحين أن الخلفية الحقة لهذه المشكلة تقتضى العلم بفيزياء الجسيمات الأولية والنظرية الكمية المجالية، وأنه فى

هذه النظرية توجد أساليب مثل **إعادة الاستنظام**[1] renormalisation. لم يكن أحد يعلم أيضا الحاجة لمعرفة نظرية **العمليات العشوائية** (الصدفية) stochastic processes وهندسة ماندليروت. كان لدى ميشيل هذه الخلفية جميعها، وقد قام بعمل الشيء الصحيح فى الوقت الصحيح، كان عملا متكاملا بكل المعايير."

جاء فايجنباوم إلى لوس ألاموس باعتقاد أن العلم الذى ينتمى إليه قد فشل فى حل معضلة اللاخطية. وعلى الرغم من أنه كفيزيائى لم ينتج الشيء الكثير، فقد كانت لديه خلفية عقلية غير عادية. كان لديه علم حاذق بأغلب المسائل الرياضية، وتقنيات الحواسب الحديثة التى استنفدت طاقات أغلب العلماء. وقد نجح فى ألا يطرد من ذهنه بعضا من رومانسيات القرن التاسع عشر التى كانت تبدو غير علمية. كان يريد أن يشتغل بعلم حديث، وبدأ بطرح أية فكرة عن التعقد جانبا، واستبدل بها أبسط معادلة تحت يديه.

■ ■ ■

تجلّى لغز الكون أول ما تجلى لدى ميشيل ذى الأربعة أعوام عن طريق المذياع الذى كان فى غرفة المعيشة بمنزله فى بروكلين بعد الحرب بقليل. كان يخلب لبه هذه الموسيقى الآتية من غير مكان. أما الفونوغراف فكان يشعر بأنه يفهمه، فجدته كانت تعطيه الاسطوانات وتعلمه كيف يشغلها.

كان فى ذهن ميشيل أن يمتهن هندسة الكهرباء، والتى كانت تُدّر دخلا لا بأس به وقتها. ولكنه أدرك فيما بعد أن ما أراد أن يعرفه عن المذياع يوجد فى مجال الفيزياء. كان من بعض العلماء النابهين الذين تخرجوا من أشهر دور العلم فى ضواحى نيويورك، منها سيتى كولدج.

كان تطوره فى اتجاه النبوغ يعنى تعارضا بين وجهته العلمية وعلاقاته الاجتماعية. لقد بدأ حياته بين الناس، ولكنه بالتدريج علم أنه لكى يحصّل شيئا من علم حقيقى عليه أن يتباعد شيئا ما، فالأحاديث العامة لم تكن تثير اهتمامه. وفى آخر سنة فى دراسته خطر بباله أنه قد فقد فترة مراهقته، فقرر أن يعوضها باستعادة علاقاته الإنسانية. كان يجلس فى مقصف الكلية يستمع لمناقشات الطلبة حول الأكل أو الحلاقة، وبالتدريج عاد لمعرفة كيفية التحدث مع الناس.

وتخرج عام ١٩٦٤، والتحق بمعهد .M.I.T، حيث حصل على الدكتوراه فى فيزياء الجسيمات الأولية. بعد ذلك قضى أربع سنوات غير مثمرة فى كورنل ومعهد فيرجينيا

التقنى، غير مثمرة بمعنى عدم نشره لبحث فى مسألة من المسائل التقليدية، رغم علمه بأهمية ذلك لمستقبل باحث شاب.

وفى لوس ألاموس كان كاوثرز، عالم فذ فى حد ذاته، يفخر بمقدرته على استقصاء النبوغ. لم يكن يبحث عن الذكاء، بل عن الإبداع الذى يلوح أنه ينبع من غدة سحرية. كان يذكر على الدوام قصة **كينيث ويلسون** Kenneth Wilson الذى بدا بدوره أنه لا ينتج شيئا البتة. كان يبدو لأى شخص بعد مدة من الحديث أن لديه فكراً عميقا فى الفيزياء، ومن ثم فقد كانت مقدرته العلمية مثارا للجدل. ثم ما لبث أن توالت أبحاثه بشكل مكثف كانهيار لسد مائي، ومنها البحث الذى حاز به جائزة نوبل عام ١٩٨٢.

كانت مساهمة ويلسون أساسا فى الفيزياء، هو واثنين آخرين؛ **ليو كادانوف** Leo Kadanoff **وميشيل فيشر** Michael Fisher. كان ثلاثتهم يتساءلون، كلٌ على حدة، عما يحدث فى التحول الطوري. وقد رأى كادانوف عام ١٩٦٠ كيف أن هذا التحول يمثل لغزا. خذ قضيبا من الحديد يمغنط، يمكن أن يكون توجيه المغناطيس فى هذا الاتجاه أو ذاك، الأمر حرية مطلقة، ولكن كل جزيء فى المعدن يجب أن يتخذ نفس القرار، فكيف؟

بصورة ما، يجب أن تنقل المعلومات عن عملية الاختيار من ذرة إلى أخرى، ولقد رأى كادانوف بثاقب بصره أن هذا الاتصال يجب أن يتم بصورة **مقياسية**، بمعنى أنه تخيّل تقسيم المعدن إلى أجزاء، كل جزء يتصل بالجزء المجاور له مباشرة. وطريقة وصف هذا الاتصال تماثل طريقة الاتصال على مستوى الذرات تماما. هنا تكمن أهمية المقياسية: أفضل طريقة ينظر فيها للمعدن هى على صورة شكل من أشكال ماندلبروت، صناديق بمقاييس متدرجة.

تطلّب تأصيل هذه المقدرة للمقياسية الكثير من التحليلات الرياضية، والكثير من الإلمام بالنظم الواقعية. شعر كادانوف أنه قد اتخذ طريقا غير ممهد، وأنه خلق عالما مليئا بالجمال المبهر والاستقلالية، جزء كبير من جماله يكمن فى **عموميته** universality، وتمثل فكرته العمود الفقرى لحقيقة صارخة عن ظاهرة حساسة للغاية، ألا وهى أن هذه التحولات غير المترابطة، غليان السوائل ومغنطة المعادن، كلها تخضع لنمط واحد من القواعد.

ثم قام **ويلسون** بجمع شمل النظرية تحت إطار نظرية **الاستنظام**، مقدمًا طريقة قوية للقيام بعمليات حسابية حقيقية عن نظم حقيقية. قد دخلت نظرية إعادة الاستنظام

علم الفيزياء، وبالتحديد النظرية الكمية فى الأربعينات لتساعد على التخلص من اللانهايات التى كانت تظهر عند حساب التفاعل بين الجسيمات الأولية. وكانت هذه اللانهايات هى التى تقلق كادانوف وويلسون، ومن ثم فقد لجئوا إلى تطبيق إعادة الاستنظام كما يطبقها علماء النظرية الكمية.

فقط فى الستينات شق ويلسون طريقه بنجاح فى عملية إعادة الاستنظام. وكما فعل كادانوف، واتته فكرة المقياسية. هناك بعض الكميات، كالكتلة، تعتبر ثابتة طبقا لخبرات الحياة اليومية، وقد نجح طريق إعادة الاستنظام المختصر فى أن ينظر إليها ككمية تتغير صعودا وهبوطا طبقا لوجهة نظر الناظر إليها. يبدو ذلك سخفا، ولكنه التماثل الحقيقى لوجهة نظر ماندلبروت حول إدراك أشكاله الهندسية وشواطئ البحار والمحيطات، والتى لا يمكن التفكير فى أطوالها على استقلال من المقياسية. إن الأمر نسبى بحسب قرب أو بعد الناظر أثناء القياس، هل هو قريب أم فى مركبة فضائية. وكما رأى **ماندلبروت**، فإن التغير عبر المقاييس ليس أمرا اعتباطيا، بل يتبع قواعد محددة. فالتغير فى الكتلة أو فى الطول يعني وجود خاصية أخرى لا تتغير. فى حالة أشكال ماندلبروت، هذه الخاصية هى البُعد الكسري، مقدار ثابت يمكن تقديره حسابيا، واستخدامه فى حسابات أخرى. والسماح للكتلة أن تتغير مقياسيا يعنى أن الرياضيين يمكنهم التعرف على تماثل عبر المقاييس.

هكذا شقت إعادة الاستنظام كما طبقها ويلسون طريقا مختلفا عبر المشاكل العويصة. لقد كانت الوسيلة إلى ذلك الحين للتعامل مع النظم اللاخطية هى تقريبها إلى أقرب نظام خطي، وتُحل المسألة على هذا الأساس، ثم تجرى عملية تقريب للنظام الفعلي، وعلى أساس درجة الدقة المطلوبة فى التقريب. كانت تعتمد عملية التقريب على ما يسمى **أشكال فاينمان** Feynman diagrams، وكلما زادت دقة التقريب المطلوبة، زاد عدد عمليات استخدام هذه الأشكال. كان أمرا مُتعباً للغاية، علاوة على اعتماد هذه الطريقة على الحظ بشكل ملحوظ. وقد وجد فايجنباوم نفسه، ككل باحث فى مجال فيزياء الجسيمات، يقوم بعدد لا يحصى من تطبيق هذه الأشكال. وقد خلّف ذلك لديه شعورا بأنها طريقة مرهقة قاتلة للإبداع، ومن ثم فقد أحب طريقة ويلسون فى إعادة الاستنظام. فعن طريق التعرف على التشابه الذاتي، يتم تبسيط التعقيد مرحلة بعد أخرى.

فى التطبيق العملى كانت طريقة إعادة الاستنظام أبعد ما تكون عن وسيلة ميّسرة تماما، فهى تعتمد على قدر كبير من الذكاء للقيام بعمليات الحساب الملائمة للوصول إلى التماثل الذاتى. ولكنها مع ذلك كانت ناجحة بقدر كبير، بالقدر الذى جعلها مصدر

إلهام للفيزيائيين، بما فيهم فايجنباوم، لكى يطبّقوها على مسائل الاضطرابات. فالاضطرابات قبل كل شيء تتمتع بالتماثل الذاتي، ترددات فوق ترددات، دوامات فوق دوامات. ولكن، ماذا عن بدء الاضطراب، تلك اللحظة الغامضة حين يتحول نظام منتظم إلى هيولي؟ لم يكن هناك من دليل على أن وسيلة إعادة الاستنظام يمكن أن تقول شيئا بهذا الخصوص. لم يكن هناك دليل، مثلا، على أن هذا التحول يتبع قوانين المقياسية.

■ ■ ■

خلال فترة التحاق **فايجنباوم** بـ MIT، حدث أن مرَّ بمجموعة جالسة فى منتزه، يستمتعون بالغذاء وتجاذب أطراف الحديث، وأخذ يلتفت وراءه ناظراً إليهم على فترات من ابتعاده عنهم، يتأمل تضاؤل أشكالهم وخفوت أصواتهم، إلى أن أصبحت أشكالهم غير مميزة، وأصواتهم غير مفهومة، وحركات أيديهم وأبدانهم مشوشة لا تُفهم، سارحا بفكره فى هذه الظاهرة المألوفة. لماذا حين تصغر الأشياء، تكون غير مفهومة؟

حاول جاهداً وبكل جدية أن يحلل هذه التجربة عن طريق آليات الفيزياء النظرية، متسائلا عما يمكنه أن يقول حول إدراك العقل البشري. إنك ترى بعض الحركات البشرية، ثم تستنبط منها أشياء. فمع اعتبار العدد الهائل من المعلومات المتاحة أمام أحاسيس البشر، كيف تقوم عُدَّة التكويد لديك بتصنيفها؟ من الواضح، أو من الواضح بقدر كبير، أن العقل لا يختزن نسخا مباشرة لكل ما فى الكون من أشياء. إنه لا يملك مكتبة لكل الأشكال والأفكار يقيس على ضوئها الصور الذهنية خلال الإدراك. إن المعلومات مخزّنة بطريقة مرنة، تسمح بالتبديل والتنسيق وإثارة الخيال، تكمن فيها صورة من الهيولية، ويبدو أن للعقل مرونة أعلى مما لدى الفيزياء التقليدية فى الكشف عن النظام بها.

فى نفس الوقت، كان فايجنباوم يفكر فى الألوان، والتى دارت حول ماهيتها معركة فى بداية القرن التاسع عشر حول رأى نيوتن ورأى جوته بهذا الخصوص. بالنسبة لآراء نيوتن الفيزيائية، لم يكن رأى جوته يزيد عن أن يكون مجرد تهويمات على هامش العلم. لقد رفض مبدأ أن اللون خصيصة استاتيكية، يمكن قياسها معمليا ثم تثبيتها كما يُفعل بفراشة على لوحة حائطية. لقد بنى جدله على أن اللون حقيقة إدراكية، وقد كتب قائلا: "بين التوازنات والتوازنات المضادة للضوء، تتأرجح الطبيعة بين حدودها المرسومة. وهكذا تنشأ ظاهرة الألوان بكافة الاختلافات والظروف التى تقدم لنا من خلالها فى الفضاء والزمن.

كان حجر الزاوية فى رأى نيوتن هو تجربة المنشور الذى حلل به الضوء، وبقفزة عبقرية تخيّل أن الاختلاف له علاقة بتردد شيء ما، أسماه جسيمات. واليوم يُعتبر اللون الأحمر مثلا هو تردد الموجات الكهرومغناطيسية بين طول ٦٢٠ و٨٠٠ جزء من بليون جزء من المتر. وبينما ذاعت أبحاث نيوتن كالنار فى الهشيم، توارت أبحاث جوته فى طى النسيان.

وظل فايجنباوم يجتهد للحصول على نسخة منها حتى وفق بعد عناء، ليجد أن جوته قد قام بالفعل بمجموعة من التجارب الغريبة خلال بحثه عن ماهية الألوان. لقد بدأ كما بدأ نيوتن، بالمنشور الزجاجي، ولكن بدلا من أن يسلط عليه الضوء، نظر من خلاله. إنه لم ير أى لون على الإطلاق، لا قوس قزح ولا أى تدرج لونى آخر.

ولكن، ما أن يعترض الصفحة البيضاء شيء ما، كبقعة صغيرة أو سحابة فى السماء، حتى تتفجر الألوان، فاستنبط من ذلك أن ما يسبب الألوان هو "التبادل بين الضوء والظلال". واستمر يدرس كيف يدرك الناس الظلال التى تصنع بمصادر لونية مختلفة، واستخدم فى ذلك الشموع والأقلام والمرايا والزجاج الملّون وضوء الشمس والقمر والبلور والسوائل والعجلات الملونة. كان يضيء شمعة مثلا أمام صفحة بيضاء من الورق عند الغسق، ثم يمسك بالقلم. كان الظل الملقى أزرق، فلماذا؟ الورقة فى حد ذاتها تدرك كبيضاء، سواء فى ضوء النهار المنصرم أم فى ضوء الشمعة الخافت، فكيف قسمها الظل إلى منطقة زرقاء ومنطقة من الأحمر الضارب للصفرة؟ "إن اللون هو نوع من الظلام، ينتمى إلى الظلال" كما اتجه رأيه. وبعبارة العلم الحديث، يأتى الضوء من الظروف المحيطية والخصائص الذاتية.

بينما كان **نيوتن** تجزيئيا كان جوته شموليا. فنيوتن جزّأ الضوء أجزاءً، ووجد أبسط شرح فيزيائى للألوان. أما جوته فقد سار خلال الحدائق ودرس اللوحات، باحثا عن تفسير أكثر عمقا وإحاطة. نيوتن وضع رأيه فى إطار رياضى يصلح للفيزياء، بينما جوته، لحسن الحظ أو لسوئه، قد هجر الرياضيات كلية.

أقنع فايجنباوم نفسه بأن **جوته** كان محقا بشأن الألوان. كان رأيه يميز، كما هو شائع فى علم النفس، بين الحقيقة الفيزيائية الثابتة، والإدراك الشخصى لها فى هيئة صور مرنة. لقد رأى فايجنباوم آراء جوته تحمل قدرا أكبر من العلم الحقيقي. كانت صعبة وتجريبية، فمرات ومرات كان جوته يركز على قابلية تجاربه للتكرار. لقد كان إدراك الألوان، بالنسبة لجوته، هو الأمر الذى يتسم بالعمومية والموضوعية. فأين هو البرهان العلمى على وجود حقيقية فيزيقية عن الاحمرار، دون أخذ الإدراك فى الاعتبار؟

وجد فايجنباوم نفسه يتساءل عن نوع الصيغة الرياضية التى يمكن بها التعبير عن الإدراك الإنساني، خاصة الإدراك الذى يمحّص كمية من التجارب المشوشة ويستخلص منها خصائص عامة. إن الاحمرار ليس بالضرورة مدى خاصاً فى الطيف الضوئي، كما ذهب نيوتن. إنه منطقة من كون هيولي، وحدود هذه المنطقة ليست ميّسرة للتعبير عنها، ولكن عقلنا يجد الاحمرار بانتظام ومع كافة المتغيرات. كانت هذه أفكار فيزيائى شاب، بعيدة كما يبدو عن مسألة اضطراب السوائل. على أنه لكى يفهم كيف يقوم العقل البشرى بالتصنيف خلال هيولية الإدراك، بالتأكيد يجب أن يعرف المرء كيف ينتج اللانظام العمومية.

■ ■ ■

حينما بدأ فايجنباوم فى التفكير عن اللاخطية فى لوس ألاموس، أدرك أن تعليمه لم يعطه شيئا نافعا. فحلّ نظم من معادلات تفاضلية لاخطية أمر مستحيل، بصرف النظر عن الأمثلة الخاصة الموجودة فى المراجع. وأسلوب التصحيحات المتوالية أملاً فى إيجاد حل تقريبى للحل الحقيقى يبدو أمرا غبيا. وقد قرأ فى المراجع عن التدفق والترددات اللاخطية، وقرر أنها لا تحوى شيئا يذكر يساعد فى وضع فيزياء معقولة. وبأدوات الحساب المتاحة لديه مع الورقة والقلم، قرر أن يبدأ بمعادلة فى بساطة معادلة ماى فى دراسة التعداد البيولوجي، وهى **المعادلة** اللوجستية ص = م س(١-س). وحتى يمكن رؤية نتيجة الحساب واضحة، فإنها توقع على شكل بياني، ويعرف المنحنى الناتج بأنه **قطع مكافئ**.

- ولم يكن الموضوع بالنسبة إلى فايجنباوم أو ماى هو إجراء الحساب مرة، بل مرات عديدة يكون ناتج كل مرة هو مدخل المرة التالية. وهكذا استعيض عن الحسابات المعقدة للفيزياء التقليدية، بعمليات بسيطة ولكن كثيرة التكرار. يراقب من يجرى هذه الاختبارات الرقمية العملية كما يراقب من يجرى الاختبارات الكيميائية نتيجة التفاعل فى دورقه. هنا يكون الناتج مجموعة من الأرقام، ليست دائما متقاربة إلى حالة الثبات، بل قد تنتهى إلى حالة ترددية بين قيمتين. وقد تنتهي، كما بيّن ماى، إلى حالة هيولية تظل على حالها من التغير طالما استمر أحد فى مراقبتها. تعتمد الحالة التى ينتهى إليها على **معامل الضبط** tuning parameter.

قام فايجنباوم بهذه التجربة الرقمية، وفى نفس الوقت قام بالمزيد من المحاولات مع الطرق التقليدية فى تحليل المعادلات اللاخطية. كان الأمر غير مجدٍ، وفى نفس الوقت

علم أن ثلاثة من رياضييٍّ لوس ألاموس؛ نيكولاس **متروبوليس** Nicholas Metropolis **وبول ستاين** Paul Stein **وميرون ستاين** Myron Stein قد قاموا بمثل هذه التحليلات من قبل، ولكن الصعوبة البالغة أقعدتهم عن المتابعة. ولذا فقد وضع فايجنباوم الموضوع على الرف.

فى تاريخ الهيولية القصير، هذه المعادلة البريئة تبيّن بكل جلاء كيف ينظر العلماء لمشكلة ما من زوايا مختلفة. بالنسبة للبيولوجي، كانت تحمل رسالة: النظم البسيطة يمكن أن تنتج أشياء معقدة. بالنسبة لرياضيي لوس ألاموس الثلاثة، كانت المشكلة هى وضع كتالوج من مجموعة من نماذج طوبولوجية دون الرجوع إلى أية قيم رقمية. كانوا يبدءون عملية التغذية الخلفية عند نقطة معينة، ثم يتابعون القيم تتراقص من مكان لآخر على منحنى **القطع المكافئ**.

لم يدرك أحد ذلك فى هذا الوقت، ولكن **لورنز** كان قد نظر إلى نفس المعادلة عام ١٩٦٤، كمثال لسؤال أعمق عن الطقس. هل للطقس قيمة متوسطة على المدى البعيد؟ أغلب علماء الطقس، وقتها والآن، يأخذون الإجابة بالإيجاب قضية مسلم بها. بالتأكيد أية قيم مقيسة، بصرف النظر عن كيفية تذبذبها، يجب أن يكون لها قيمة متوسطة. وكما بيّن لورنز، فإن القيمة المتوسطة للطقس فى ١٢٠٠٠ عاما الأخيرة تختلف عنها لفترة ١٢٠٠٠ عام السابقة عليها، حين كانت أمريكا الشمالية مغطاة بالجليد. هل كان هناك طقس معين وقد تغير إلى طقس آخر لسبب فيزيائي؟ أم هناك فترة زمنية أطول يمكن اعتبار هاتين الفترتين مجرد تذبذبات خلالها؟ أم ترى يمكن اعتبار أن نظاما كالطقس لا يتقارب أبدا إلى متوسط معين؟

وسأل لورنز سؤالا ثانيا؛ لنفرض أنك استطعت بالفعل كتابة مجموعة من المعادلات للقوانين التى تحكم الطقس، هل يمكنك عن طريقها حساب متوسطات إحصائية لدرجات الحرارة أو معدل الأمطار؟ لو أن المعادلات كانت خطية، لكانت الإجابة بكل سهولة نعم، ولكنها غير خطية. و الرب لم يجعل مثل هذه المعادلات متاحة، فإن لورنتز قد اتجه إلى **معادلة الفروق التربيعية** quadratic difference equation.

وكما فعل ماي، قام لورنز بتكرار حساب المعادلة بمعاملات معيَّنة. عند معدَّل معيّن كانت المعادلة تنتهى إلى نقطة ثابتة مستقرة. هنا ينتج النظام "طقسا" بالمعنى السطحي، ثابت لا يتغير. ومع معدل أعلى، وجد الطقس يتأرجح بين حالتين، ويؤول إلى متوسط ثابت. ولكن بعد قيمة معينة، وجد حالة الهيولية تبرز. وحيث إنه كان يفكر فى الطقس، لم يكن يسأل عما إذا كانت التغذية الخلفية سوف تنشئ تصرفًا دورياً، بل

أيضا عن قيمة المتوسط، وكان يعلم أن المتوسط بدوره يتأرجح غير مستقر. فحين يتغير المعامل بدرجة طفيفة، فإن المتوسط يتغير بصورة جسيمة. وبنفس الطريقة، لا يُنتظر أن يستقر طقس الكرة الأرضية على متوسط على المدى البعيد.

كبحث رياضي، يُعتبَر بحثاً فاشلا، فهو لم يبرهن على شيء بالمعنى الرسمي. وكبحث فيزيائي، فهو أيضا مليء بالعيوب، لأنه لم يستطع أن يبرر استخدامه لهذه المعادلة في حسابه للطقس الأرضي. ولكن لورنز كان يعرف ما يقول. كان لورنز قد بدأ يفهم بعمق أكثر عن احتمالات النظم الهيولية، عمق أكبر من أن يعبر عنه بلغة الطبيعة الجوية.

وبينما هو مستمر في استكشاف الأقنعة المتغيرة للنظم الديناميكية، أدرك لورنز أن النظم الأعقد قليلا عن المعادلة المذكورة، يمكن أن تنتج نظما غير متوقعة. فبداخل نظام معين يمكن أن تختبئ أكثر من حالة استقرار واحدة. قد يرى المراقب تصرفا مستقرا على مدى طويل من الزمن، ولكن تصرفا آخر تماما للنظام قد يبدو طبيعيا كالأول بالضبط. مثل هذا النظام يسمى "**لا متعدى** Intransitive"، فهو يستقر على حالة من الحالتين، ولكنه لا يجمع بينهما. فهو محتاج لركلة من خارج النظام لكي ينقلب من حالة إلى حالة أخرى. إن نظاما واضحا من هذا القبيل هو بندول الساعة، حيث يعوض الطاقة التي يفقدها من الاحتكاك من مصدر طاقة خارجي كزنبرك أو بطارية كهربية، فيستقر على ذبذبة معينة. فلو أن عابرا هز البندول، فهو قد يسرع أو يبطئ وقتيا، ولكنه سوف يعود لتردده الأصلي. على أنه للبندول حالة استقرار أخرى، حل صحيح لمعادلة الحركة، وهو حالة السكون. وكمثال أقل وضوحا لنظام من هذا القبيل، وربما بأكثر من حالة استقرار، قد يكون الطقس الجوى ذاته.

منذ وقت طويل يعرف علماء الطقس الذين يستخدمون نماذج حاسوبية لتمثيل تصرف الطقس والمحيطات على المدى الطويل أن هذه النماذج تسمح على الأقل بحالة توازن أخرى تختلف اختلافا بيّناً. خلال العصور الجيولوجية الماضية، لم يحدث هذا المناخ البديل، ولكنه يمكن أن يكون حلا صحيحا للمعادلات التى تحكم الطقس الجوي. إنه ما يسمونه "**الطقس الأرضى الأبيض**"، طقس للأرض يغطى قاراتها الجليد ومحيطاتها الثلوج. إن سطح الأرض فى هذه الحالة سوف يعكس سبعين بالمائة من الطاقة الشمسية، ومن ثم تظل البرودة قارصة. وسوف تنكمش طبقة التروبوسفير–الطبقة السفلى من الهواء الجوي–بدرجة كبيرة، وتقل حدة الرياح كثيرا. على وجه العموم، سوف يكون الطقس أقل استضافة للحياة عما هو الآن. وللنماذج الحاسوبية ميل شديد للوقوع فى قبضة توازن الطقس الأبيض هذا، لدرجة أن علماء الطقس يتعجبون لماذا لم يتحقق إلى الآن، ولعلها مجرد صدفة.

ولدفع الأرض إلى هذا الطقس يحتاج الأمر إلى ركلة قوية من مصدر خارجي.
ولكن لورنز وصف نوعا آخر من التصرفات المقبولة علميا، قريب الشبه بالنظام الأول، فيه يستقر النظام على التذبذب حول متوسط معين لمدة طويلة، ثم بلا سبب على الإطلاق يتحول إلى نمط آخر، يتذبذب فيه حول متوسط آخر. ويعرف مصممو النماذج الحاسوبية باكتشاف لورنز هذا، ولكنهم يتحاشونه تماما، فهو غير قابل للتوقع بقدر كبير. إن انحيازهم الطبيعي هو لصالح بناء نماذج لها ميل للعودة إلى التوازن كما نراه الآن في جو الأرض. أما لتفسير التغيرات الضخمة، فهم يقدمون تبريرات أخرى، مثل تغير مسار الأرض حول الشمس. ولكنهم يعرفون تماما أن حل لورنز يمكن أن يفسّر انحراف طقس الأرض نحو العصور الجليدية دون سبب معروف على فترات غير منتظمة.
لو كان الأمر كذلك، فسوف يغنينا عن البحث عن تفسيرات، إنها نتاج طبيعي للهيولية.

■ ■ ■

مثلما يحنُّ جامع الأسلحة النارية في عصر الأسلحة الأوتوماتيكية إلى طراز عتيق، يشعر بعض العلماء اليوم بحنين إلى الآلة الحاسبة HP-65 اليدوية. في عصر تسيّد هذه الآلة، أمكنها أن تغير من عادات الكثير من العلماء نهائيا. بالنسبة إلى فايجنباوم كانت المعبر بين الورقة والقلم، وبين الحاسوب الشخصي الذي لم يكن متصورًا بعد.

لم يكن فايجنباوم يعرف شيئا عن لورنز، ولكن في مؤتمر بأسبن، كولورادو، سمع ستيف **سمول** يتحدث عن بعض الخصائص الرياضية لنفس معادلة **الفروق التربيعية**. كان سمول يظن، بغريزته عن المواضيع الحساسة، أن الموضوع سوف يفتح الباب لأسئلة حول النقطة المحددة للتحوّل من النظام إلى الهيولية. وبالفعل قرر فايجنباوم أن يغوص فيها بعمق مرة أخرى، وانطلق بآلته الحاسبة يجري مجموعة من الجبر التحليلي والاستكشافات الرقمية لكي يلم شمل فهمه عن المعادلة، مركزا على الحدود بين النظام والهيولية

وفقط على سبيل التمثيل، كان يعلم أن هذه المنطقة أشبه بالحدود الغامضة بين التدفق السلس والمضطرب. إنها المنطقة التي أثار روبرت ماي انتباه البيولوجيين المهتمين بالتعداد إليها، والذين لم يكونوا يتخيلون شيئا غير الدورية المنتظمة في تغير تعداد الكائنات. يتمثل الطريق إلى الهيولية خلال هذه المنطقة سلسلة من تضاعف الفترة، انقسام الفترتين إلى أربعة، والأربعة إلى ثمانية، وهلم جرا. لقد أنتجت هذه الانقسامات نمطا مثيرا للإعجاب. إنها النقاط التي فيها تؤدي التغيرات الطفيفة في الخصوبة مثلا إلى تغير فترة الأربع سنوات إلى ثماني سنوات. وقرر فايجنباوم أن يبدأ في حساب العامل الذي ينتج هذا الانقسام.

فى النهاية، كان بُطء الآلة الحاسبة هو ما أدى إلى كشفه. لو أنه استخدم حاسوبا بقدرته الفائقة، لما قدر له أن يرى نمطا على الإطلاق. لقد كان مضطّرا لكتابة الأرقام باليد، ثم يفكر فيها بينما هو ينتظر، وبعدها، لكى يوفر الوقت، يخّمن ما تكون عليه الأرقام التالية.

وفجأة أحس بأنه ليس مضطرا للتخمين. لقد كان هناك انتظام غير متوقّع مختبئ فى اللانظام. كانت الأرقام تتقارب هندسيا، بنفس طريقة تقارب صف من أعمدة الهاتف نحو الأفق فى رسم المنظور؛ لو عرفت ارتفاع عمودين فيه، لعرفت ارتفاع بقية الأعمدة، فالنسبة محفوظة بين الأعمدة. لم يكن تضاعف الفترات يتوالى بسرعة، بل كان يتوالى أيضا بمعدل ثابت.

لماذا يجب أن يكون الأمر كذلك؟ إن وجود **التقارب** الهندسى يعنى عادة أن شيئا ما، فى مكان ما، يكرر نفسه على مقاييس مختلفة. ولكن لو كان هناك نمط مقياسى فى هذه الدالة، فإن أحدا لم يلحظه للآن. وحسب فايجنباوم نسبة التقارب بأكبر دقة تتيحها آلته، ثلاثة أرقام عشرية، وكانت النتيجة ٤٫٦٦٩ هل يعنى هذا الرقم بالذات شيئا ما؟ وقام فايجنباوم بما يقوم به أى إنسان على علاقة قوية بالأرقام، أن يحاول ربط الرقم بأى ثابت من الثوابت الرياضية المعروفة كالنسبة التقريبية، دون جدوى.

ومن الغريب أن ماى قد أدرك بعد ذلك أنه أيضا قد شاهد هذا التقارب الهندسي، ولكنه نسيه بنفس السرعة التى شاهده بها. فمن وجهة نظر ماى فى النظم البيئية، لم يمثل سوى رقم من الأرقام ليس إلا، ففى العالم الواقعى للنظام الذى كان يقوم بدراسته، تعداد الكائنات أو الاقتصاد، فإن التشوش فى هذه النظم يمكن أن يغطى على أية تفاصيل بهذه الدقة. لقد كان متأثرا بالسلوك الشامل للمعادلة، فلم يتخيل قط أن التحليل الرقمى له أهمية تُذكر.

كان فايجنباوم يعلم ما حصل عليه، لأن التقارب الهندسى يعنى أن ثمة شيئا ما فى المعادلة يتصرف بطريقة مقياسية، وأن هذه المقياسية لها أهميتها. فنظرية إعادة الاستخدام برمتها تعتمد عليها. ففى نظام يبدو أنه بلا ضوابط، تعنى المقياسية أن هناك خصيصة ما ثابتة بينما الكل يتغيّر، شيء من انضباط يختفى تحت سطح الاضطراب. ولكن أين؟ كان صعبا عليه أن يعرف خطوته القادمة.

وفى أواخر أكتوبر، خطرت له خاطرة. لقد كان يعلم أن متروبوليس وستاين وستاين قد بحثوا معادلات أخرى أيضا ووجدوا بعض الأنماط تنتقل من معادلة لأخرى. كانت إحدى المعادلات دالة مثلثية، تحتوى على جيب المتغير، إذ كانت على الصورة: ص = ر جا ط س، (حيث ط النسبة التقريبية)، وبدأ يجرى الحسابات عليها كما سبق. كان

حساب النسب المثلثية يجعل العملية أشد بُطئاً، ولكنه حين حسب التقارب وصل إلى نسبة بدقة ثلاثة أرقام عشرية، وكانت ٤,٦٦٩

شيء لا يكاد يُصدَّق، هذه المعادلة المثلثية لم تكن فقط تبدى ثباتا وانتظاما هندسيا، بل كانت تبدى انتظاما يتساوى رقميا مع انتظام دالة أبسط منها بمراحل. ليس فى عالم الرياضيات أو الفيزياء ما يبين كيف يمكن لمعادلتين تنتميان إلى نوعين مختلفين تماما أن تؤديا إلى نفس النتيجة.

استدعى فايجنباوم زميله بول ستاين، الذى لم يثره هذا التوافق العرضي، فالدقة مهما كانت منخفضة. واتصل فاينجنباوم بوالديه، قائلا إنه قد توصل إلى شيء سوف يحقق له الشهرة. ثم انكب على كل ما أمكنه من معادلات تحتوى على تسلسل من التفرع الثنائى وهو بسبيله للاضطراب، وأنتجت كل معادلة نفس الرقم.

لقد تلاعب فايجنباوم بالأرقام كثيرا، كان فى فترة المراهقة يحسب اللوغارتمات والنسب المثلثية التى تستخرج عادة من الجداول الرياضية. ولكنه لم يكن يعرف كيف يعمل مع حاسوب أكبر من آلته الحاسبة، وكان فى ذلك يعتبر فيزيائيا ورياضيا نمطيا، يميل إلى ازدراء التفكير الميكانيكى الذى يمثله العمل بواسطة الحاسوب. والآن، حان الأوان لتغيير رأيه. تعلّم فورتران، وقام بالحساب بدقة أكبر، إلى خمسة أرقام عشرية، ٤,٦٦٩٢٠ , وفى اليوم التالى زاد من الدقة، ٤,٦٦٩٢٠١٦٠٩٠، دقة تكفى لإقناع بول ستاين. ورغم ذلك، لم يكن فايجنباوم واثقاً من أنه أقنع نفسه. لقد بدأ بالبحث عن الانتظام، فهذا ما يعنيه فهم الرياضيات. ولكنه أيضا قد بدأ عالما بأن بعض المعادلات المعينة، بالضبط كبعض النظم الفيزيائية الخاصة، تتصرف بأسلوب خاص متميز. وقد كانت هذه المعادلات قبل كل شيء بسيطة. كان فايجنباوم يفهم معادلة الفروق التربيعية، والمعادلة الجيبية، ليس فيهما من صعوبة الرياضيات شيء يذكر. ولكن شيئا ما فى قلب هاتين المعادلتين المختلفتين يتكرر، منتجا رقما موحدا بينهما، هل بالفعل قد اكتشف قانونا جديدا من قوانين الطبيعة، أم أن الأمر مجرد اتفاق عارض؟

لنفرض أن عالما فى علم الحيوان فى عصر ما قبل التاريخ، تخيّل خصيصة مجرَّدة تُسمَّى الوزن، وأنه توقع أن له علاقة بالحجم، فجمع بعضا من الحيوانات المختلفة، ثعبان ضخم وثعبان صغير، دب ضخم ودب صغير، واخترع آلة لقياس الخصيصة التى تصورها، وحين بدأ تجاربه، وجد أن وزن الثعبان الضخم هو نفسه وزن الثعبان الضئيل، وأن وزن الدب الضخم هو نفسه وزن الدب الصغير، بل الأدهى أن هذه الأوزان الأربعة متساوية، ٤,٦٦٩٢٠١٦٠٩٠، ألا يحق له أن يظن أن هذا الرقم لا يعبر بالمرة عن الخصيصة التى تصورها، ألا وهى الوزن، وأن المسألة تستحق إعادة التفكير؟

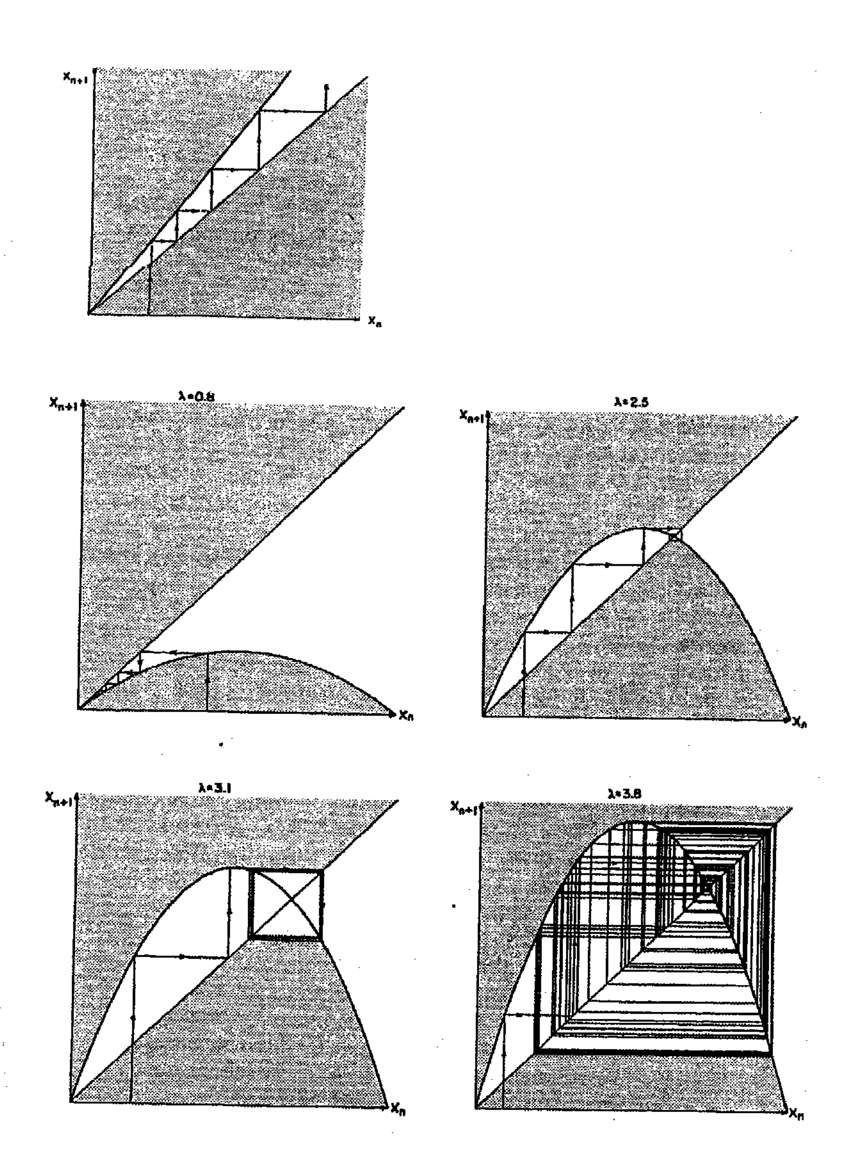
التيارات المتدفقة، والبندولات المتأرجحة، والدوائر الإلكترونية المهتزة، نظم فيزيائية مختلفة تعتريها تغيرات وهى فى طريقها للهيولية، وهذه التحولات قد استعصت تماما على التحليل. إن كافة المعادلات التى تتحكم فى هذه النظم معروفة تماما، ولكن الخوض فيها على المدى الطويل يبدو أمرا مستحيلا. الغريب أن هذه المعادلات أقل صعوبة بكثير عن معادلة لوجستية بسيطة وحيدة البعد. ولكن اكتشاف فايجنباوم قد بين أن نوعية المعادلات خارجة عن الموضوع، فأيا ما كانت المعادلة، فإن النتيجة واحدة.

رغم أن الارتباط بين التحليل الرقمى والفيزياء كان واهيا، إلا أن فايجنباوم قد وجد شواهد على الحاجة فى التفكير فى وسيلة جديدة لحساب النظم اللاخطية المعقدة. كان التكنيك المتبع إلى الآن يعتمد على تفاصيل المعادلات، فإذا كانت المعادلة جيبية، عليه أن يحسب الجيوب. ويعنى اكتشافه للعمومية أن هذا التكنيك يجب أن يتخلى عنه، إن الانتظام regularity لا علاقة له بالجيوب، ولا بالقطع المكافئة، ولا بأية معادلة معينة. ولكن لماذا؟ كان الأمر محبطا، لقد كشفت الطبيعة ستارا للحظة، معطية لمحة عن نظام ما، فما عساه يكون وراء الستار؟

■ ■ ■

حين جاء الإلهام، كان على هيئة صورة، طيف جال بالذهن لشكلين غاية فى الصغر، وواحد أكبر. ذلك كل ما كان فى الأمر. صورة براقة حادة محفورة فى الذهن، ربما ليست أكثر من قمة مرئية لجبل جليد من العمليات الذهنية تجرى تحت الستار فى العقل الواعي. كانت مرتبطة بموضوع المقياسية، وأعطت فايجنباوم الطريق الذى يحتاج إليه.

كان يدرس الجاذبات. إن التوازن المستقر الذى يحصل نتيجة عمليات **التطبيق** mapping التى أجراها هو نقطة تجذب إليها كل الأشياء الأخرى، بصرف النظر عن "التعداد" الابتدائي، فإنه سوف يسعى متراقصا نحو الجاذب. وعند أول تضاعف للفترة، ينقسم الجاذب إلى اثنين، كمثل الخلية فى انقسامها. فى البداية كانت هاتان النقطتان معا من الوجهة العملية، ثم ينفصلان مع ارتفاع المعامل. ثم تضاعف تال للفترة، كل نقطة للجاذب تنقسم مرة أخرى، وفى نفس اللحظة. كان رقم فايجنباوم يرشده متى يكون التضاعف التالي. والآن اكتشف أنه يمكنه أن يستنتج أيضا القيم الحقيقية لكل نقطة على هذا الجاذب الذى يزداد تعقيدا. كان بإمكانه توقع التعداد الحقيقى الذى يحدث فى فترة التردد البالغة سنتين، هنا أيضا تقارب هندسي، الأرقام أطاعت أيضا قانون المقياسية.



شكل ٦-١: بالنسبة للبيئى قد يكون أكثر المعادلات توقعاً هى معادلة خطية، تمثل نظرة مالتوس للتكاثر البيئى نمو بمعدل ثابت يسير إلى ما لا نهاية (الشكل العلوى لليسار)(**)

المعادلات الأكثر واقعية ترسم خطا منحنيا، يجعل التعداد يتردد بين ازدياد (نتيجة التكاثر) النقصان (نتيجة عوامل الافتراس مثلا)، مثل معادلة الفروق التربيعية (اللوجستية) ص = م س(١−س).

الأشكال الأربعة التالية تمثل هذه المعادلة عند قيم مختلفة للمعامل "م" (يعبر عنه فى الأشكال بالحرف اليونانى لامدا). ترسم هذه المعادلة بيانيا على شكل الكأس المقلوبة (تسمى رياضيا قطع مكافئ) والتى يتغير شكلها من حيث الارتفاع والاتساع مع تغير المعامل "م". لاحظ أن الخط الأفقى يعبر عن تعداد هذا العام، والرأسى يعبر عن تعداد العام المقبل.

يسير التحليل الرقمى لهذه المعادلة بالخطوات التالية:

- نأخذ نقطة إعتباطية على المحور السينى تمثل تعداد هذا العام، نرسم خَطاً عموديا يتقاطع مع منحنى الدالة عند قيمة تمثل تعداد السنة الثانية.
- طالما أن تعداد هذا العام هو نفسه المدخَل للعام المقبل، فإننا نرسم خَطاً مائلاً بزاوية ٤٥ درجة. يتميز هذا الخط بأن كل نقطة عليه يكون إحداثها السينى مساو لإحداثها الصادي.
- نرسم خطا أفقيا من النقطة التى حصلنا عليها فى الخطوة الأولى (تعداد السنة الثانية) ليقطع الخط المائل ثم نهبط بخط رأسى لمنحنى الدالة، فيكون التعداد فى السنة الثالثة.
- وهكذا من كل نقطة على منحنى الدالة نرسم خطا أفقيا يقطع الخط المائل، ثم آخر رأسيا فنحصل على تعداد السنوات المتتالية (نفس الفكرة مطبقة مع الشكل الأعلى يسار، ولكن مع خط مستقيم وليس قطع مكافئ).

يعتمد التصرف بدرجة حساسة على المعامل "م"، على النحو التالى: (١) عند م =٠,٨ يتجه الكائن تدريجيا إلى الانقراض. (٢) عند م = ٢,٥ يتجه الكائن إلى الاستقرار عند قيمة معينة. (٣) عند م = ٣,١ يحدث التفرع الثنائي، فترى الخطوط تدور فى مربعين. المفروض أنه بزيادة المعامل عن ذلك يحدث تفرع آخر، حيث تدور الخطوط فى أربعة مربعات، وهكذا. (٤) عند المعامل ٣,٨ تظهر حالة الهيولية، فتصنع الخطوط مربعات تتغير فى أحجامها بالزيادة والنقصان بدون أن تستقر على حالة معينة.

كان فايجنباوم يستكشف أرضاً مجهولة، منطقة متوسطة بين الرياضيات والفيزياء، وكان عمله من الصعب تصنيفه. لم يكن رياضيات، فهو لم يكن يثبت شيئا ما. كان يدرس الأرقام، والأرقام هى حقا أساسية فى الرياضيات، ولكنها فى ذلك مثل قطع العملة لرجل الاستثمار، هامة، ولكن ليس فيها ما يشغل ذهنه حولها. إن الأفكار هى السلعة الأساسية للرياضيات، وقد كان فايجنباوم يبحث فى الفيزياء، ولكنها، وهنا مكمن الغرابة، كانت نوعا خاصا من فيزياء تجريبية.

الأرقام والمعادلات كانا مادة دراسته، بدلا من الإلكترونات والكواركات. كانت لهما منحنيات ومسارات، وكان يريد أن يستكشف تصرفاتهما. كان الحاسوب هو معمله، وبالإضافة إلى نظريته، كان يؤسس أسلوبا فى العمل. الأسلوب العادى فى التعامل أن المستخدم يضع مسألة، يغذى بها الحاسوب، ثم ينتظر النتيجة. لكل مسألة واحدة، نتيجة واحدة. وقد كان فايجنباوم وباحثو الهيولية الذين تبعوه يحتاجون المزيد. إنهم يريدون عمل ما عمله لورنز من قبل، أن يصنعوا عوالم مُصغَّرة ويشاهدوها تتطور على شاشة الحاسوب، ثم يغيروا فى هذا المعامل أو ذاك، ويروا الأثر المترتب على ذلك. كان اقتناعهم هو أن تأثيرات طفيفة يمكن أن تتمخض عنها آثار جسام.

وشعر فايجنباوم بمدى عجز قدرة الحاسوب فى لوس ألاموس عن الوفاء بمتطلباته. كان مُقدراً له أن ينتظر مدة قبل أن يحصل على حاسوب مكتبى يصل ثمنه إلى ٢٠ ألف دولار يخصص لأبحاثه، أما فى ذلك الوقت فقد كان الحاسوب المتاح من النوع المركزى متعدد المستخدمين، له عدة طرفيات يستخدم هو واحدة منها، فكانت طريقة العمل أن يرسل عبر أسلاك التوصيل العملية التى يريدها، وينتظر حتى يفرغ له الحاسوب ويخرج له النتيجة. وبالنسبة للمخرجات الرسومية كانت الوسيلة العتيقة التى هى إخراج حروف مثل × أو + لتمثيل الأشكال المطلوبة.

وبينما كان يجرى حساباته، كان يفكر، أية رياضة حديثة تصلح لإنتاج أنماط المقياسية المتعددة التى يريد أن يشاهدها. لقد أدرك أن شيئا ما فى تلك المعادلات يجب أن يتمتع بخصيصة "**المعاودة** recursion"، أى **مرجعية ذاتية** self-referential، تصرف واحد يسترشد بتصرف آخر كامن بداخله. الصورة المهزوزة التى جالت بخاطره فى لحظة الإلهام كانت تعبر عن شيء ما متعلق بطريقة من معالجة مقياسية لدالة لكى تتماشى مع دالة أخرى. لقد جرب أسلوب إعادة الاستنظام، والذى يتيح التخلّص من اللانهايات.

وفى صيف ١٩٧٦ اندفع يعمل كالمحموم كما لم يفعل طوال حياته. كان يركز تفكيره كما لو كان ممسوسا، يضع البرامج ويشغلها ويبرمج من جديد، دون أن يحاول طلب معاونة من قسم البرمجة، لأن ذلك سيعنى فصل نفسه عن الحاسوب لاستخدام الهاتف، وبالتالى لا يدرى متى يتاح له مرة أخرى. وعلى أية حال فقد كان يواجه بفصل الحاسوب عنه بين الحين والآخر، تاركا إياه يغلى غيظا وكمدا. أخذ يعمل لشهرين بمعدل اثنتين وعشرين ساعة يوميا، يخلد إلى النوم بعقل هائج بالأفكار، ويصحو ليجد فكره فى نفس النقطة التى كانت قبل نومه. لم يزد غذاؤه عن فناجين القهوة (كان غذاؤه أصلا لا يزيد عن أكثر اللحوم خلوا من الدهنيات، والقهوة، حتى أن أقرانه كانوا يتندرون بأنه يحصل على حاجته من الفيتامينات من سيجارته)

وتطلب الأمر أخيرا تدخلاً طبيا، ولكن وقتها كان قد توصَّل إلى نظرية شاملة, ٣

■ ■ ■

العمومية تصنع الفرق بين الجميل والمفيد. فالرياضيون، بعد حد معيّن، لا يعنيهم تقديم آليات لإجراء الحسابات، والفيزيائيون، بعد حد معين، يحتاجون للأرقام. **ونظرية العمومية** universality تقدم أملا أنه بحل المسائل البسيطة فى الفيزياء يمكن حل المسائل الأكثر تعقيدا، إذ تكون الإجابة متماثلة. والأكثر من ذلك، فإنه بوضع نظريته فى إطار إعادة الاستنظام، فقد أعطاها فايجنباوم ثوبا يجعل الفيزيائيين يعتبرونها وسيلة لإجراء الحسابات، تقريبا شيئا قياسيا.

ولكن الشىء الذى جعل نظرية العمومية ذات فائدة كان صعبا على الفيزيائيين الاعتقاد به. فهى تعنى أن النظم المختلفة يمكن أن تتصرف بطريقة متشابهة. طبعا كان فايجنباوم يدرس معادلات رقمية بسيطة، ولكنه كان يعتقد أن هذه النظرية تعبر عن قانون شامل يحكم كافة التحولات من الانتظام إلى الاضطراب. فكل إنسان يعلم أن الاضطراب يعنى كمّا من الترددات المختلفة، وكل إنسان يتعجب من أين أتت هذه الترددات. إن المضمون الفيزيائى هو أن النظم الواقعية تتصرف بطريقة متشابهة، بل ونتائج قياساتها متشابهة. فنظرية العمومية لفايجنباوم ليست وصفية فقط، بل وكمية أيضا. لا تتضمن أشكالا فقط، بل أرقاما أيضا. بالنسبة للفيزيائيين، يشق ذلك على تصوراتهم.

وظل فايجنباوم يحتفظ بخطابات الرفض لسنوات عديدة فى درج مكتبه. كان عمله فى لوس ألاموس قد جرَّ عليه شهرة ومالاً، ولكن الأمر اقتضى عامين من الرفض من محررى المجلات العلمية منذ أن بدأ يراسلها. إن حقيقة أن الاكتشافات العلمية الرائعة

وغير المتوقَّعة تُرفَض عند محاولة نشرها تبدو أسطورة سخيفة. فالعلم الحديث، بكم المعلومات الهائل الذى يحتويه وطرقه التجريبية، لا يجب أن يكون مجال تذوق خاص. وقد اعترف رئيس تحرير بعد ذلك بأعوام أنه قد رفض بحثاً يمثل نقطة انقلاب فى المجال، ولكنه كان على رأيه فى أن البحث لم يكن ليقابل تذوق قرّائه من الرياضيين التطبيقيين. وأثناء ذلك، حتى بدون بحث، كان اكتشاف فايجنباوم المذهل قد أصبح بمثابة الخبر الصاعقة لدى دوائر معينة فى الرياضيات والفيزياء. فالمضمون الأساسى للنظرية كان يذاع بالطرق التى تذاع بها أغلب الآراء العلمية الآن، من خلال المحاضرات والمراسلات. كان فايجنباوم يعلن عن نظريته خلال المؤتمرات، ويُطلب منه نسخ منها، بالعشرات فى البداية، ثم بالمئات.

■ ■ ■

هناك افتراض فى نطاق العلم بشيوع المعلومات العلمية، بحيث إنه ما أن يحدث اكتشاف جديد حتى يكون معلوما للكافة على الفور. وبذلك يُبنى كل كشف وكل فكرة جديدة على الحصيلة العلمية القائمة، وهكذا يبنى العلم كما تُشيّد المبانى، حجرا بعد حجر.

وتصلح هذه الفكرة فى حالة وجود معضلة محدّدة تحديدا دقيقا، فى مجال علمى عالى التنظيم. فحين اكتُشف التركيب الجزىء لـ د.ن.أ. مثلا، تقبّله الجميع بقبول حسن. ولكن الأمور لا تسير دائما هذا السير للأفكار الجديدة، فحين بدأ ظهور علم اللاخطية مشرذما فى أركان من مجالات مختلفة، لم يحظ بهذا الطريق الممهّد للانتشار والذيوع. وحين بزغت الهيولية كمضمون متكامل، لم تكن قصتها فقط قصة الأفكار والاكتشافات الحديثة، بل أيضا فَهَماً تأخر أوانه لأفكار قديمة دخلت طى النسيان، لماكسويل وبوانكريه، بل وآينشتاين أيضا. فأجزاء كثيرة منها لم تُفهم إلا من كل عالم فى مجاله، الجانب الرياضى بواسطة الرياضيين، والجانب الفيزيائى بواسطة الفيزيائيين، أما الجانب المتصل بعلم الطبيعة الجوية فلم يفهمه أحد. إن شيوع الأفكار أصبح هاماً بقدر أهمية إبداعها.

كل عالم له مجموعته الخاصة من المريدين، ومجاله الخاص من الفكر، ومن ثم فكانت الصورة لديه قاصرة بالضرورة. فالعلماء منحازون بطبيعتهم تأثرا بتقاليد مجالهم أو بأسلوب تعليمهم. ليس من رابط يجمع الجميع، عدا محاولات فردية محدودة الأهداف والأثر.

فإلى أواخر السبعينات، وفى خضم الأبحاث والاكتشافات، لم يكن اثنان من الرياضيين يفهمون الهيولية بنفس الطريقة، فأولئك المنتمون إلى النظم **غير التشتتية**

(المحافظة conservative) دون احتكاك أو تشتت للطاقة يعتبرون أنفسهم مرتبطين بالروس من أمثال **كولموجوروف** Kolmogorov **وأرنولد** Arnold، والمنتمون إلى النظم الديناميكية **ببوانكريه وبركهوف وسميل**، والبيولوجيون إلى سميل **وماى ويورك**، **والجيولوجيون وعلماء المعادن** لماندلبروت، وتتوالى التجمعات بلا حصر، بينما قد لا يكون عالم فى البصريات قد سمع بالاسم أساسا.

وكان قدر فايجنباوم أن يخوض طريقا خاصا من الكفاح. فى مرحلة بزوغ شهرته، اتهمه البعض أن مجال عمله ضيق للغاية، جميل بلا شك، ولكن ليس فى اتساع عمل يورك مثلا. وقد تعرض للمز ذات مرة من ماندلبروت عام ١٩٨٤، فى حفلة تسليم جائزة نوبل دُعى فيها فايجانباوم لإلقاء كلمة الحفل٤، فيما وُصف بأنه "محاضرة مضادة لفايجنباوم". لقد نبش بطريقة ما عن ورقة نُشرت منذ اثنين وعشرين عاما عن تضاعف الفترات، كتبها عالم فنلندى يدعى **مايبرج** Myberg، وظل يردد تسمية هذه الظاهرة بظاهرة مايبرج، مُتجاهلا عمل فايجنباوم فى الموضوع.

ولكن فايجنباوم اكتشف العمومية، ووضع نظرية تفسّرها، وأصبحت الركاز للعلم الجديد. وحين عزّ عليه نشرها فى المجلات العلمية، قام بنشرها بنفسه فى المؤتمرات واللقاءات العلمية. وقوبل اكتشاف النظرية بالإعجاب، وعدم التصديق، والانبهار. فكلما فكر عالم فى اللاخطية، زاد شعوره بقوة عمومية فايجنباوم. لقد عبر عن ذلك أحدهم بكل بساطة قائلا: "كان كشفا سعيدا ومثيرا للغاية، أن توجد هياكل فى النظم اللاخطية، متماثلة على الدوام لو نظرت لها على الوجه الصحيح". والتقط بعض العلماء ليس الفكرة فقط، بل التكنيك أيضا، فاللعب بهذه الخرائط، مجرد اللعب، كان يثير فى أنفسهم الانفعالات. فبآلاتهم الحاسبة، استطاعوا أن يعايشوا حالات الاندهاش والرضا التى مكّنت فايجنباوم من الاستمرار فى لوس ألاموس. ومنهم من ساهم فى تنقيح النظرية ومدِّ نطاقها، منهم **بريدراج سفتنوفيك** Predrag Cvitnovic عالم الجسيمات، فى حين أنه بين أقرانه لم يفصح لهم عما كان يعمله، مُدّعيا أنه كان فقط يقتل الوقت.

كما لاقت النظرية تحفظاً من الرياضيين، بقدر كبير بسبب أن فايجنباوم لم يقدّم برهانا قويا. وفى الواقع لم تحظ النظرية بالبرهان الرياضى إلا بحلول عام ١٩٧٩، فى أعمال **أوسكار لانفورد الثالث** Oscar Lanford III. يتذكر فايجنباوم دائما قصة محاضرة ألقاها فى لوس ألاموس أمام صفوة من العلماء، حيث لم يكد يبدأ محاضرته حتى هبّ الرياضى الشهير مارك كاك Mark Kac قائلا: "سيدى، هل أنت بصدد تقديم تحليل رقمى أم برهان؟"

ورد فايجنباوم بأن ذلك متروك لتقدير المستمعين، وبعد إنهاء محاضرته سأل كاك عن رأيه، فأجاب: "نعم، إنه حقا لبرهان معقول، ولنترك التفاصيل للرياضيين."

ودبت الحركة، وكان لاكتشاف العمومية دور القيادة فيها. في صيف ١٩٧٧ نظّم الفيزيائيان **جوزيف فورد** Joseph Ford **وجوبليو كازاتى** Giullio Casati أول مؤتمر عن علم جديد يسمى الهيولية، في فيلا أنيقة ببلدة كومو Comoبإيطاليا. وحضر حوالى مائة عالم، أغلبهم من الفيزيائيين. وعقّب فورد قائلا: "لقد رأى ميشيل العمومية واكتشف كيف تتصرف بطريقة مقياسية واستنبط طريقة للتحول إلى الهيولية تخلب اللب بحق. لقد كانت المرة الأولى التي نحصل فيها على نموذج واضح يمكن لأى إنسان أن يفهمه.

لقد كانت من الأشياء التي آن أوانها. كان الناس في مجالات مختلفة، من علم الحيوان إلى الفلك، يفعلون نفس الشيء، وينشرون في مجلاتهم التخصصية المحدودة الانتشار، غير منتبهين لأعمال غيرهم في نفس الموضوع، وينُظر إليهم من أقرانهم على أنهم من غريبي الأطوار. لقد كادوا يبكون فرحا حين اجتمع شملهم أخيرا."

---

i أسلوب رياضي يهدف إلى إزالة نقاط الشذوذ وعدم الاتصال في المعادلات الرياضية-المترجم

(*) التحليل الرقمي للمعادلة ص = م س الواردة في الفصل الثالث. المترجم

ii النتائج التي حصل عليها من الحاسوب هي الخرائط هي التي سبق الحديث عنها في الفصل الثالث، والتي تسمى أشكال فايجنباوم (راجع شكلي ٣-١ و٣-٢). المترجم

iii كان الفائزان بالجائزة هما كارلو روبيا Carlo Rubbia وسيمون فان در مير Simon Van Der Meer عن اكتشاف الجسيمان الحاملان للقوة النووية الضعيفة والمسميان .W, Z المترجم



بـــدء الاضـطــراب

كان **ألبرت لبشابر** Albert Libchaber مثاراً للدهشة والإعجاب فى مدرسة الإيكول نورمال سوبريور، والتى تقبع هى والإيكول بوليتكنيك على قمة النظام التعليمى بفرنسا، بفضل ما وُهب من نضج مبكر. وسرعان ما صنع لنفسه اسما متميزا فى فيزياء الحرارة المنخفضة، ودراسة تصرفات الهليوم فائق السيولة على ضوء النظرية الكمية، وذلك عند درجات حرارة لا تبعد عن الصفر المطلق إلا بقدر أنملة. على أنه بدا عام ١٩٧٧ وكأنه يضيع وقته وموارد الكلية فى تجربة تبدو تافهة، حتى أنه هو نفسه كان يتساءل عن جدواها. وخشية منه أن تضر هذه التجربة بمستقبل طلاب الدراسات العليا، فإنه لم يطلب أحدا منهم لمشاركته فيها، واستخدم مهندسا متخصصا بدلا من ذلك.

قبل خمس سنوات من غزو الألمان لباريس، ولد لبشابر لأبوين بولنديين يهوديين، وجدٍّ حاخام. وقد نجا من ويلات الحرب بنفس الطريقة التى نجا بها ماندلبروت، بالاختفاء فى المناطق الريفية، منفصلا عن والديه اللذين اختفيا فى مكانٍ آخر. وقد كان إنقاذ حياته بفضل شهامة أحد رؤساء الاستخبارات الفرنسية، وقد ردّ له الجميل حين شهد لصالحه فى المحاكمات التى تلت الحرب لأعوان النازي، وكانت لشهادته أثر فى إنقاذ منقذه، وهو آنذاك فى العاشرة من عمره.

وسريعا ما خط سلّمه العلمى فى الحياة الأكاديمية الفرنسية، فلم يكن نبوغه موضع شك على الإطلاق، وكان هوسه بالقراءة موضع تندر، فقد كان يقتنى المئات من الطبعات الأصلية لكتب علمية، يرجع تاريخ البعض منها إلى القرن السابع عشر، لم يكن يقرؤها كتاريخ للعلوم، بل كمنجم للأفكار العلمية عن حقيقة الطبيعة، نفس الحقيقة التى كان يسبر غورها عن طريق أجهزة الليزر وملفات التبريد الفائق عالية التقنيّة.

وقد وجد فى المهندس الذى اختاره لمساعدته روحا متوافقة. كان يُدعى جين موريه Jean Maurer، فرنسى لا يعمل إلا بما يحس به. بدأ الاثنان يصممان تجربة تهدف إلى الكشف عن بدء الاضطراب.

كان لبشابر كتجريبى معروفاً بذهن وقّاد، وتفضيل للقوة الذهنية على القوة العضلية، عزوفا عن الحسابات المعقدة والتقنيات المغالى فيها. كانت فكرته عن التجربة الجيدة كفكرة الرياضيين عن البرهان الجيد، الإيجاز مع الجمال، لقد كان يعطى الجمال حقه من التقدير بقدر ما يعطى للنتائج.

كانت تجربته من الصغر لدرجة أنه يحملها فى صندوق للثقاب حين يحلو له أن يطوف بها على أقرانه، كقطعة من الفن الرفيع. كان يسميها "الهليوم فى صندوق صغير"، فلم يكن قلب التجربة يزيد عن بذرة ثمرة الليمون، خلية مصنوعة بعناية فائقة من الصلب المقاوم للصدأ، ممتلئة بالهليوم فى درجة حرارة أربعة درجات مطلقة.

كان المعمل يشغل الدور الثانى من مبنى الإيكول نورمال بباريس، على بعد مئات قليلة من الأقدام من معمل لويس باستير القديم. وكشأن كافة المعامل الفيزيائية الجيدة متعددة الأغراض، كان فى حالة من الفوضى الشاملة، من أدوات يدوية مبعثرة هنا وهناك وقطع من البلاستك والمعدن فى كل مكان. ووسط هذه الفوضى كان الجهاز الذى يضم الخلية الضئيلة المحتوية على السائل عمليا بقدر كبير، أسفله صفيحة من نحاس غاية فى النقاء، وفوقه رقيقة من بلّورة السفير. كانت المواد تُختار طبقا لخصائص توصيلها للحرارة. كان الجهاز يحتوى على ملف حرارى صغير، وحشية من مادة التفلون. وكان الهليوم يغذى من خزان، لم يزد هو نفسه عن نصف بوصة مكعبة حجما. والنظام ككل داخل وعاء مفرغ من الهواء بدرجة كبيرة. والوعاء بدوره مغمور فى نيتروجين سائل، لتحقيق توازن درجة الحرارة.

كان لبشابر قلقا على الدوام من جهة الاهتزازات. فالتجارب، مثلها فى ذلك مثل النظم اللاخطية الواقعية، تجرى عادة بخلفية من الشوشرة تفسد القياسات وتشوه البيانات. وفى تجربة مثل تجربته التى صمّمها لتكون على أعلى درجة من الحساسية يمكن للتشويش أن يؤثر عليها بدرجة كبيرة، فيغير من نمط التصرف إلى نمط آخر. على أن **اللاخطية**، كما تخلّ بتوازن النظم، يمكن أيضا أن تساعد فى توازنها. **فالتغذية الخلفية** اللاخطية يمكن أن تجعل الحركة أكثر استقرارا. ففى النظم الخطية يكون للاضطراب تأثير وحيد، ولكن فى النظم اللاخطية يمكن أن يعود الاضطراب ليلاشى أثر الاضطراب الأول، فيكون النظام متوازنا آليا. وكان لبشابر يعتقد أن النظم البيولوجية تستخدم لاخطيتها للدفاع عن نفسها ضد **التشويش**، فى نقل الطاقة بواسطة البروتين، وفى الحركة الموجية لكهرباء القلب، والجهاز العصبى، كلها حافظت على فعالية أدائها فى وسط مشوش. وكان لبشابر يأمل فى يكون الهيكل التحتى للتدفق، مهما كانت طبيعته، من الاستقرار بحيث يمكن لتجربته أن تكشف عنه.

وكانت خطته أن ينتج **تيارات حمل** بجعل أسفل الخلية أكثر حرارة من أعلاها. كان هذا يماثل بالضبط نموذج تيارات الحمل الذى وصفه **لورنز**، وهو النظام الكلاسيكى لتيارات الحمل المعروف باسم رايلاي-برنارد **Rayleigh-Benard**. لم يكن الأوان قد حان ليُسمع لبشابر عن لورنز، كما لم يكن لديه أدنى فكرة عن نظرية فايجنباوم. ففى ١٩٧٧ كان فايجنباوم قد بدأ سلسلة محاضراته، ولم يكن لاكتشافاته أثرها إلا لدى القادرين على فهمها. ولكن ما كان بإمكان غالب الفيزيائيين قوله، هو إن أنماط وأشكال فايجنباوم المنتظمة لم تكن تحمل أية علاقة واضحة بالنظم الواقعية، فهى لم تنبع إلا من ثنايا آلته الحاسبة، أما النظم الفيزيائية فأعقد من ذلك بكثير. وأقصى ما يمكن لأحد قوله هو أنه قد اكتشف شيئا من التماثل الرياضى ببدء الاضطرابات.

كان لبشابر يعلم أن التجارب الحديثة أضعفت من فكرة **لاندو** عن بدء الاضطرابات، ببيان أنها تبدأ فجائية، بدلا من تكديس متواصل للترددات، وأن نظرية جديدة يجب أن توضع، وكان يأمل أن تعطى هذه الهباءة من السائل صورة تحمل أكبر قدر من التفصيل حول بدء الاضطرابات.

■ ■ ■

إن النظرة الضيقة يفترض أنها فى صالح العلم. فمن وجهة نظر علماء ديناميكا الموائع هم على حق فى الشك فى درجة الدقة العالية التى ادّعاها سوينى وجولوب فى أبحاثهم. وبناء على هذه النظرة، كان الرياضيون على حق فى مقاومة رول لكسره القواعد. لقد وضع نظرية فيزيائية طموحة مختبئة تحت ستار من عبارات رياضية محكمة، فجعل من العسير الفصل بين ما افترضه وما أثبته. إن الرياضى الذى يرفض الاعتراف بفكرة إلا أن تكون على صورة: نظرية، إثبات، نظرية، إثبات، يلعب دوراً أملته عليه قواعد مجاله العلمي؛ وسواء عن وعى أو عن غير وعي، فإنه يقف حارسا ضدّ التزوير والغموض. والمحرر العلمى الذى يرفض الأفكار الجديدة بسبب أنها مصاغة بأسلوب غير مألوف يبدو وكأنه يقف يلعب نفس الدور للعلم نيابة عن أهله، ولكنه أيضا له دور يلعبه بحجة الحذر مما لم يتم تجربته. وحين كان زملاء لبشابر يطلقون عليه "الغامض"، لم يكن ذلك على سبيل الدعابة.

كان مُجربًا يتميز بالمهارة والانضباط، ودقتة فى سبر أغوار المادة، ومع ذلك فقد كان يُكنّ شعورا تجاه الشيء المجرد صعب التحديد، المسمى "التدفق". فالتدفق شكل مضاف إليه تغير، حركة مضاف إليها هيئة. فالفيزيائى حين يتصور نظاما من

معادلات تفاضلية سوف يسمى حركتها الرياضية تدفقا. إن التدفق فكرة أفلاطونية، تفترض أن التغير فى النظم يعكس حقيقة ما، مستقلة عن لحظة معينة. وقد اعتنق لبشابر فكرة أفلاطون بأن الكون مليء بالأشكال المختفية. "ألست حين تنظر لأوراق الشجر، تحس أن الأشكال الأولية محدودة؟ بإمكانك رسم الشكل الأساسى بسهولة. قد يكون مثيرا لك أن تحاول فهم ذلك. لقد رأيت ذلك فى تجارب لسوائل متداخلة فى بعضها **البعض**" كان على مكتبه صور مبعثرة لمثل هذه التجارب، أسطوانات من سوائل على هيئة **أشكال ماندلبروت** الفراكتلية. "والآن، حين تشعل الغاز فى مطبخك، ترى اللهب يتخذ أشكالا أيضا. إنه شيء غاية فى الاتساع، شيء شامل. إننى لا أهتم إن كان لهبا يشتعل أو سائلا فى سائل أو جسما صلبا يتبلور، إن ما يهمنى هو هذا الشكل.

منذ القرن السابع عشر وهناك تصور من نوع ما أن العلم يفتقد تطوّر الأشكال فى الفراغ وتطورها فى الزمن. يمكنك أن تفكر فى التدفق بعدة طرق، تدفق فى الاقتصاد أو تدفق فى التاريخ، يمكن فى البداية أن يسير خطيا، ثم يتفرع إلى حالة أكثر تعقيدا، ربما مع **اهتزاز دورى** oscillation، بعد ذلك، قد يصير هيوليا"

عمومية الأشكال، التماثل عبر المقاييس، قدرة **المعاودة** لتدفق داخل **تدفق**، مفاهيم تخرج تماما عن نطاق أسلوب معالجة التغير عن طريق المعادلات التفاضلية. إلا أن ذلك لم يكن سهلا رؤيته. فالمسائل العلمية تصاغ باللغة العلمية المتاحة. وحين بدأ لبشابر وبعض من المجربين الآخرين النظر فى حركة السوائل، فإنهم قاموا بذلك بروح الشعراء أكثر من روح العلماء، حين أحسوا بوجود رابطة بين الحركة والأشكال الأولية عامة الوجود. كانوا يحصلون على البيانات بالطريقة الوحيدة المتاحة لديهم، كتابة الأرقام أو تسجيلها على الحاسوب، ثم يبدءون فى البحث عن طريقة لتنظيمها كيما تظهر على هيئة تلك الأشكال. كانوا يأملون فى التعبير عنها بمعلومية الحركة، مقتنعين أن الأشكال الديناميكية مثل اللهب والأشكال العضوية مثل أوراق الشجر تستمد أشكالها من تموج لم يفهم بعد للقوى. وقد نجح من تجاربهم ما تابعوا فيها الهيولية بكل جدية، بفضل رفض أية حقيقة يمكن أن تجمد بلا حراك.

■ ■ ■

كان **جوته** مصدر إلهام للبشابر، كما كان بالنسبة لفايجنباوم. وبينما كان الأخير ينقب فى مكتبة جامعة هارفارد عن "**نظرية الألوان** ***Theory of colors***" لجوته، كان الأول قد تمكن بالفعل من أن يضم لمكتبته النسخة الأصلية من المقال الأكثر غموضا

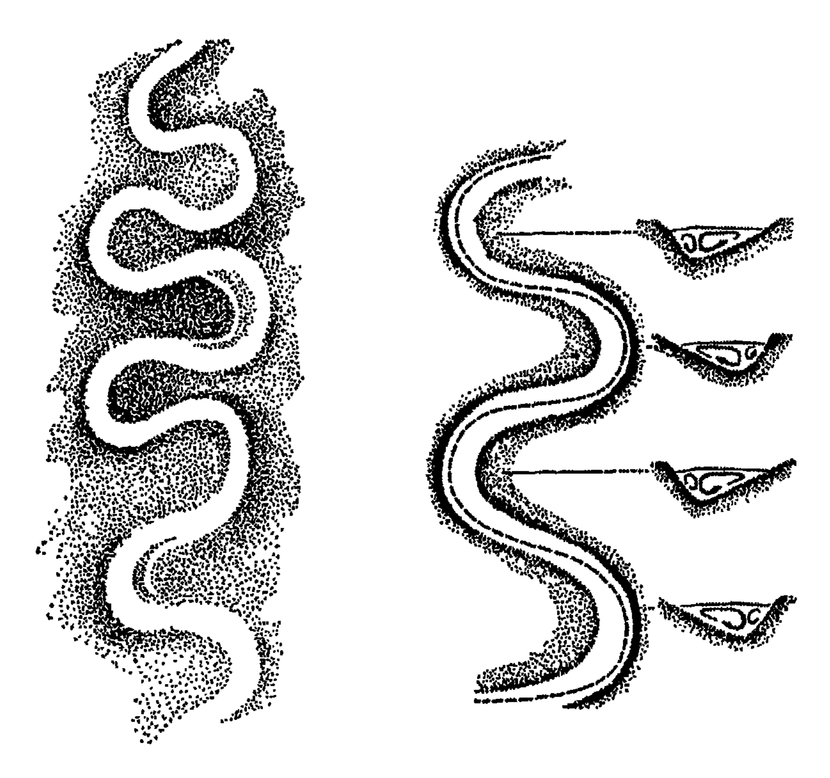
"**التحول فى النباتات** *On the transformation of plants*"، والذى مثّل هجوما غير مباشر على الفيزيائيين الذين كان يتهمهم جوته بالتركيز المطلق على الجانب الاستاتيكى من الظواهر، دون القوى الحيوية والتدفقات التى تصنع الأشكال التى نراها فى الطبيعة بين لحظة وأخرى. وكان جزء من تراث جوته شبه العلمى لا يزال حيا فى ألمانيا وسويسرا، بواسطة فلاسفة مثل **رودولف شتاينر** Rudolf Steiner **وتيودور شفنك** Theodor Schwenk. وكانا أيضا محط إعجاب بالغ من لبشابر.

كان التعبير الذى استخدمه **شفنك** عن علاقة القوى بالأشكال هو "**الفوضوية الحساسة** *Das sensible Chaos*" استخدمه كعنوان لكتاب صغير طبع عام ١٩٦٥، وسرعان ما تعددت طبعاته بعد ذلك. كان الكتاب عن المياه فى المقام الأول، وقد حظى بتقدمة وتقريظ من مجلة متخصصة فى هندسة المياه. لم يكن يشوب العرض إلا النذر اليسير من العلم، وليس من رياضيات على الإطلاق. يحوى نظرات لفنان لا تخطئها العين، فقد جمع فيه كما هائلا من الصور والمخططات أشبه بما يخطه عالم بيولوجيا حين يرى خلية تحت مجهره لأول مرة. كان يتمتع بعقلية منفتحة، وسذاجة طفولية تدعو جوته للفخر.

تملأ التدفقات صفحات الكتاب، أنهار عظمى **كالميسيسيبى** تتمعّج وتتلوى وهى فى طريقها إلى البحر، وعنده تصنع دوامات وتتأرجح يمنة ويسرة. لم يكن شفنك يؤمن بالصدف البحتة، بل بالمبادئ العامة، وأكثر **من العمومية**، كان يؤمن بروح للطبيعة جعلت كتابه مليئا بالتجسيد، فالتيار "ينزع إلى تحقيق ذاته بصرف النظر عما حوله من عقبات".

كان يعلم بوجود تيارات ثانوية خلال التيار الأصلي، مياه تتحرك تحت تدفقات النهر، وحول محوره، وهبوطا إلى قاعه، وارتفاعا إلى سطحه، ويمنة ويسرة فى اتجاه شواطئه. كان لدى شفنك خيال طوبولوجى لمثل هذه الأنماط "إن هذه الصورة لجدائل ملتفة معا فى شكل حلزونى صحيحة فقط فيما يتعلق بالحركة الظاهرية، ولكنها ليست فى الواقع جدائل منفردة، بل أسطح كاملة تتدافع وتلتف فى الفراغ حول بعضها البعض." كان يرى الموجات تتصارع وتتسابق، تقسم الأسطح والحدود بين الطبقات. ويفهم الدوامات على أنها دوران لسطح حول الآخر. وقد اقترب فى ذلك إلى أدنى مسافة بين فيلسوف وعالم فيزيقى فى تصور ديناميكية الاضطرابات. كانت عقيدته الفنية تفترض العمومية. فالدوامات لديه تعنى عدم الاتزان، وعدم الاتزان يعنى لديه أن تدفقا يصارع ضد عدم مساواة فى داخله، وعدم المساواة فكرة عامة، لا علاقة لها

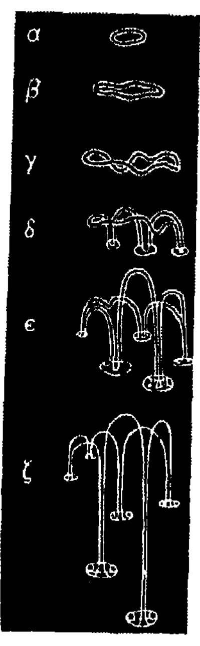
بطبيعة الوسط أو نوع الاختلاف؛ فكل من **الدوامات المائية**، والنباتات الملتفة، وسلاسل الجبال المتجعدة، جميعها تتبع خطا واحدا فى نظره. فعدم المساواة قد يكون بين الحار والبارد، الملح والعذب، الحمضى والقلوي، البطيء والسريع، الكثيف واللطيف، اللزج والمائع. وعند الحدود، تزدهر الحياة.

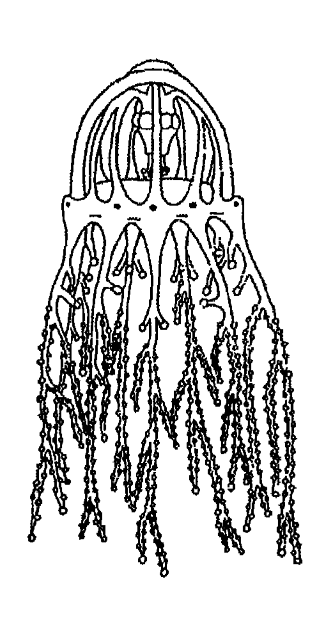


شكل ٧-١ تموجات وتعرجات فى مسارات الأنهار. رسم تيودور شفنك التيارات للتدفقات الطبيعية، والتى تسير كجدائل من حركة ثانوية معقدة. يقول: "إنها ليست جدائل حقيقية، بل أسطح بأكملها، تتداخل فراغيا"

على أن الحياة كانت هى مجال عالم البيولوجى **دارسى تومسون** D'Arcy Wentworth Thompson، والذى كتب عام ١٩١٧ يقول: "قد يقال إن كافة قوانين الطاقة، وخواص المادة، وتفاعلات الكيمياء، عاجزة عن شرح جسم الإنسان كعجزها عن فهم الروح، ولكن الأمر بالنسبة لى ليس كذلك". وقد أدخل دارسى تومسون فى

البيولوجيا ما أهمله شفنك، الرياضيات، فالأخير قد جادل عن طريق المقابلة، وكانت قضيته روحية، مزدهرة، موسوعية، انتهت بإظهار التماثل. وقد تشابه عمل دارسى الرائع "حول النمو والأشكال **On Growth and Forms**" مع شفنك فى بعض من مزاجه وبعض من أسلوبه. ويعجب القارئ لصور دقيقة للغاية لنقاط من الماء المتساقط، بينما هى معلقة تتأرجح، متجاورة مع قناديل البحر، تماثلها فى الحياة بطريقة مدهشة. أهذه مجرد صدفة عارضة؟ أليس لنا حين نرى شكلين متماثلين، أن نتساءل حول أسباب مشتركة؟





شكل ٧-٢ قطرات متساقطة: صور دارسى القطرات المعلقة لنقاط الحبر وهى تتساقط خلال الماء (يسار) ولقناديل البحر (يمين). "نتيجة مثيرة أن نرى كيف تعتمد هذه القطرات بدرجة حساسة للظروف الابتدائية، كتغيير طفيف للغاية فى كثافة السائل."

يعتبر دارسى تومسون بلا جدال أقوى بيولوجي وقف على حدود العلم تأثيرا. فالثورة التى عاصرهـا فى علم البيولوجيا قد مرت دون التفات له بالمرة، فهو قد أنكر الكيمياء، ولم يفهم الخلية تماما، وعجز عن توقع ثورة الجينات.

وكانت مقالاته، حتى فى وقته، من الجمال بحيث لا تحسب كمقالات علمية. فلا يُتخيل من دارس للبيولوجيا الحديثة أن يقرأ شيئـا من كتبه، ولكن أعظم البيولوجيين كانوا يجدون أنفسهم بصورة أو بأخرى مشدودين لها. لقد وصفها سير بيتر ميداوار Sir Peter Medawarبأنها: "بلا نقاش أجمل ما كتب من أدبيات العلوم فى اللسان الإنجليزى على مدى تاريخ الكتابـة العلميـة". أما ستيفان جاى جولد Stephan Jay Gould فلم يجد أفضل منها ينسب إليه إحساسه الكامن بوحدة الطبيعة فى تكوين الأشكال. فليس ثمـة غيره من العلماء المحدثين قد تابع البحث فى موضوع الوحدة التى لا تنكرهـا العين للخلائق، وقد عبرّ عن ذلك بقوله: "قليل هم من تساءلوا عما إذا كان بالإمكان اختصار الأنماط إلى نظام واحد للقوى المولدة. وقليل هم من وُهبـوا الإحساس بأهمية إثبات هذه الوحدة لعلم الأشكال العضوية."

كان هذا الكلاسيكي، متعدد اللغات، الرياضي، عالم الحيوان، يحاول رؤية الحياة فى كلّيتها، بينما العلم الحديث يسير فى طريق تجزئتها إلى عناصرها الأولية. وانتصر تيار التجزئة، فكيف لك أن تفهم الخلية إلا بفهم الغشاء الخلوى والنواة، ومنها تتدرج إلى البروتينات والإنزيمات والكروموزومات ثم القواعد المزدوجة؟ إن البيولوجيا حينما خاضت فى المخ والجهاز العصبي، فقدت الاهتمام بشكل الجمجمة. آخر إنسان يفكر فى ذلك، لم يكن سوى دارسي تومسون. كما كان آخر بيولوجى عظيم على مدى سنوات يستجمع طاقة بلاغية لمناقشة قضية الأسباب مناقشة مستفيضة، خاصة فى التمييز بين **السبب الوظيفى**[iii] final cause **والسبب الفيزيقى** physical cause. فالعجلة مستديرة لأن هذا هو أنسب الأشكال لأدائها لوظيفتها، أما الأرض فمستديرة لأنها خضعت لقوانين الفيزياء حين تكوينها. الأول سبب وظيفي، فهو مرتبط بالغرض من الشيء، والثانى سبب فيزيائي، مرتبط بالقوى المشكلة. وقد يجتمع السببان فى شيء واحد، فالكأس مستديرة لأن هذا الشكل هو أنسب الأشكال لحفظ الماء حين الشرب، وهى كذلك لأنها تعرضت لأسلوب تشكيل معين.

وفى نطاق العلم ككل، تكون الغلبة للأسباب الفيزيقية. فالغائية لم تكن إلا فى فترة تدثُّر العلم بعباءة الدين. على أنه فى مجال البيولوجيا، فحين وضع **داروين نظريته عن التطور**، وضعها على أسباب غائية صرفة، وأصبح التركيز منصّبا على الأسباب الوظيفية، كما تمليها نظرية الانتخاب الطبيعى، فشكل ورقة الشجر على هذه الصورة لأنّه الشكل الأنسب لتجميع ضوء الشمس. وكم توسل "دارسي" للبيولوجيين ألا يهملوا

الأسباب الفيزيقية عند الأخذ بالأسباب الوظيفية. على أن دعوته لم تجد أذنا مصغية، تخيل الثراء عند التحدث فى مدى ملاءمة شكل ورقة الشجرة لوظائفها، ودور **الانتخاب الطبيعى** فى الوفاء بهذه المطالب. فقط بعد حين من الزمن بدأ بعض العلماء يفكرون فى الجانب غير المطروق من الطبيعة، إن أشكال ورق الشجر محدودة للغاية، بينما الأشكال المتصوَّرة لا حصر لها، وعلى ذلك فشكل ورقة الشجر ليس محددا بوظيفتها تحديدا قاطعا.

لم تسعف الرياضيات المتاحة لدارسى أن يبرهن على ما يريد إثباته، وأفضل شيء كان بإمكانه هو أن يرسم مثلا الجمجمة لمجموعة من الأنواع، مظللا أجزاءها، ومبيّنا أن تحول شكل للآخر يخضع لقواعد هندسية بسيطة للتحويل. وللكائنات البسيطة، حيث تحمل أشكالها تشابها يلفت النظر مع قطرات الماء وظواهر أخرى للتدفقات، فقد حاول إيجاد سبب فيزيقي، كالجاذبية والتوتر السطحي، وهى أسباب لم تسعفه فيما كان يصبو إليه. لماذا إذن كان ألبرت لبشابر يفكر فى "عن النمو والأشكال" حين بدأ تجاربه عن السوائل؟

إن حدس دارسى عن القوى التى تشكل الحياة هى أقرب شيء فى مجال البيولوجيا إلى منظور النظم الديناميكية. لقد نظر للحياة كحياة، دائبة الحركة، تستجيب دائما إلى الإيقاع؛ "الإيقاعات الكامنة فى عمق عملية النمو" التى كان يعتقد أنها خلقت الهيئات عامة الوجود. فهو لم يعتبر أن دراسته الحقة تقتصر على الشكل المادى للأشياء، بل على ديناميكيتها، "التفسير، بمفهوم القوة لعمليات الطاقة". لقد كان رياضيا بالقدر الكافى لأن يفهم به أن تجميع الأشكال لا يعنى شيئا، ولكنه كان شاعريا بالقدر الكافى بأن يحس بأنه لا الصدفة ولا الغرض يمكن أن يفسرا الوحدة المبهرة للأشكال التى جمعها على مر سنوات من التحديق فى الطبيعة. إن القوانين الفيزيائية يجب أن تفسر كيفية تحكم القوى فى عملية النمو، الأمر الذى كان خارج نطاق الفهم لأمد طويل. أفلاطونية مرة أخرى. وراء كل شكل منظور، لا بد وأنه تقبع أشكال غامضة غير منظورة تقوم بعمل الأنماط القياسية، إنها الأشكال حية متحركة.

■ ■ ■

اختار لبشابر الهليوم السائل لتجربته، والهليوم السائل ذو لزوجة متناهية فى الصغر، ومن ثم فيدفع للتحرك بأقل دفعة. ولو اختار شيئا آخر كالماء أو الهواء لاحتاج

صندوقا أكبر. وبواسطة اللزوجة المنخفضة، جعل لبشابر تجربتة فى غاية الحساسية للتسخين. ولبدء تيارات الحمل فى خليته الدقيقة، كان محتاجا لفرق بين القاع والسطح يعادل جزءا من ألف جزء من درجة الحرارة. ولو كان الصندوق أكبر حجماً، حيث يكون السائل حر الحركة بصورة أكبر، فإن فرق درجتى الحرارة يكون أصغر. فلصندوق أكبر بنسبة عشرة أضعاف يكون الفرق فى حدود جزء من مليون جزء، وهو فرق يستحيل التحكم فيه.

وكرّس لبشابر ومهندسه فى بناء التجربة جهدا بالغا لجعل الحركة التى هم بصدد دراستها فى أدنى صورة لها. فحركة الموائع وهى تتحول من السلاسة إلى الاضطراب يزداد التعقد فيها بسرعة خرافية، حيث تنتج الدوامات والتموجات بصورة يصعب ملاحقتها. ولذا فهو قد جعل الفراغ فى التجربة أقرب ما يكون لنقطة بلا أبعاد. وإنتاج حركة فى حيز محدود أفضل بمراحل من التدفق فى حيّز مفتوح كتيارات المحيطات مثلا، حيث يزداد التعقد بدرجة تستعصى على الدراسة التى هو بصددها.

وحيث إن الحمل فى صندوق مغلق ينتج موجات دورانية فى السائل أشبه بأصابع السجق، أو لنقل فى هذه التجربة أشبه ببذور السمسم، فقد اختار لبشابر أبعاد جهازه بعناية بحيث تتولد دورتان من تيار الحمل بالضبط، يتصاعد السائل فى المنتصف، ثم ينقسم عند السطح إلى دورة لليمين ودورة لليسار. دورتان غاية فى الدقة الهندسية، خطوط مساريهما فى غاية الإتقان.

وخلال التجربة، يأخذ الهليوم فى الدوران داخل الخلية التى هى بداخل الوعاء المفرّغ بداخل حمام النيتروجين، ولقياس الحرارة غرس فى سفير السطح العلوى مجسّين غاية فى الدقة، تسجل قراءتهما عن طريق راسم، فيتاح له مراقبة الحرارة عند نقطتين على السطح. لقد كانت تجربة غاية فى الدقة والحساسية، كما وصفها أحد الفيزيائيين، لقد تمكن لبشابر من خداع الطبيعة.

استغرقت التجربة بهذا الإبداع الأسطورى من الدقة عامين كاملين لتؤتى نتائجها، ولكنها، كما قال لبشابر، كانت الأداة المطلوبة لعمله بالضبط. وأخيرا رأى كل شىء؛ فبإجراء التجربة متواصلة ليل نهار على مدى العامين، أتيح له رؤية نمط ثرى **لبدء الاضطراب** يفوق خياله. لقد ظهر تتابع **تضاعف الفترات**. لقد جعل لبشابر حركة سائل يرتفع مع تسخينه محدودة نقية إلى أقصى حد، فوجد العملية تبدأ بأول حالة استقرار يتوازن فيها السائل عند درجة حرارة مناسبة لا تزيد عن جزء من ألف من درجة الحرارة.

إلى الآن كانت التجربة كلاسيكية غير مثيرة، وكانت بالضبط معبرة عن النموذج الذى وضعه لورنز بمعادلاته الثلاث. ولكن تجربة حية، بسائل حقيقي، وصندوق صنع على يد صانع، ومعمل معرض للاهتزازات من وسائل المرور الباريسية، كل ذلك جعل مهمة تجميع البيانات أكثر صعوبة من مجرد تجميع أرقام من حاسوب.

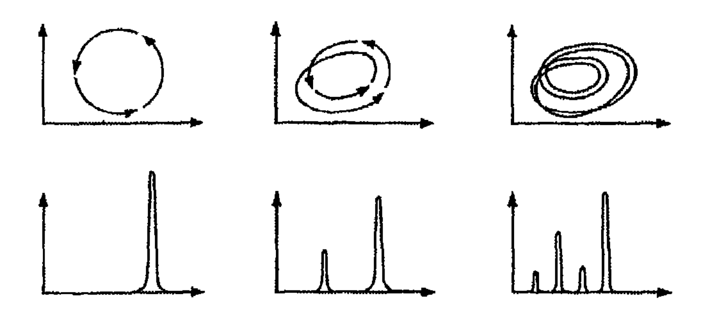
عند اتزان الحركة بعد الاستقرار الأول، تكون درجة الحرارة عند أية نقطة على السطح ثابتة إلى حد ما، ويقوم الراسم برسم خط مستقيم. وعند رفع درجة الحرارة، يبدأ عدم التوازن، ويرسم الراسم خطاً متموجاً.

من خط بسيط يمثل الحرارة، تشويه الذبذبات بسبب الشوشرة، يصعب تحليل تردد التغير فى درجة الحرارة لعزل الصورة الحقيقية لتصرف السائل عن الشوشرة المحيطة بالتجربة. ولهذا الغرض استخدم لبشابر جهازا خاصاً يسمى **محلل الموجات**، كالذى يحلل النغمات الصوتية إلى تردداتها. يخرج هذا الجهاز خطا مشوشا يمثل الشوشرة، ثم يسجل كل تردد حقيقى كقفزة فجائية على الشكل الناتج.

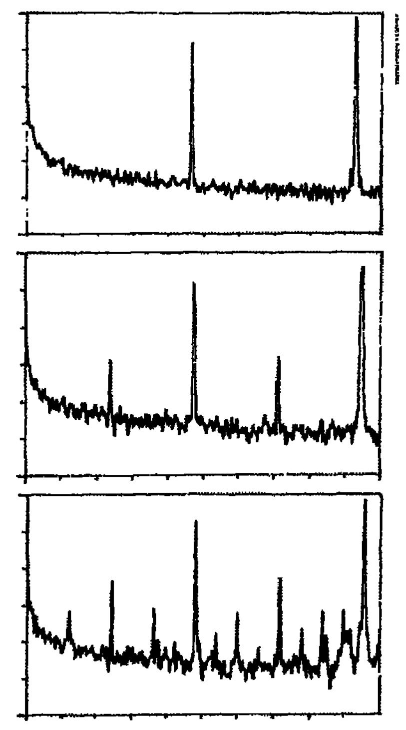
فى تجربة لبشابر كان الطول الموجى للتردد عند التوازن الأول ثانيتين.

ومع الاستمرار فى رفع درجة الحرارة وازدياد التعقيد فى شكل الخط المرسوم، ظهر تردد جديد مع التردد الأول، بطول موجى يساوى ضعفه بالضبط، إذ يتكرر كل أربع ثوان. إنها حالة التوازن الثانية. وعند كل حالة استقرار جديدة تنشأ مع الاستمرار فى رفع درجة الحرارة، تتوالى حالات **التفرع الثنائى**، أربع دورات، فثمانية، وهكذا.

لو أن لبشابر كان قد سمع وقتها عن اكتشاف **فاجنباوم لظاهرة العمومية**، لعرف بالضبط أين يتوقع التفرعات الثنائية، وكيف يقدر قيمها. فى ١٩٧٩ كان العدد من بين الرياضيين والفيزيائيين من ذوى النزعة الرياضية المهتمين باكتشاف فايجنباوم يتنامى، ولكن الكثرة الغالبة رأت الحكمة فى التحفظ عن إبداء الرأي. فتمثيل التعقد على خرائط ماى أو فايجنباوم لنظم وحيدة البعد شيء، والقيام بذلك لنظم ثنائية أو ثلاثية أو رباعية الأبعاد، كالأنظمة الميكانيكية التى يصممها المهندسون شيء آخر. فهذه النظم محتاجة لمعادلات تفاضلية قوية، وليس مجرد معادلة للفروق. ثم إن هناك فجوة أخرى بين النظم قليلة الأبعاد ونظم **تدفق الموائع**، والتى ظنّها العلماء لانهائية الأبعاد. فحتى خلية لبشابر متقنة الصنع تحتوى على عدد لانهائى من الجزيئات، يبدى كل جزيء منها مقدرة على الحركة على استقلال، حين يدخل فى دوامة أو اضطراب.



شكل ٧-٣ نظرتان للتفرع الثنائي: حين تنتج تجربة كتجربة لبشابر للحمل حركة دورية مستقرة بتردد ثابت، فإن فضاء الطور يكّون منحنىً مغلقا يكرر نفسه على الدوام (أعلى يسار)، يمثل بنبضة واحدة فى التحليل الطيفى (أسفل يسار). ومع تطور التجربة يكون التوازن مستقرا على دوريتين، (الشكلين الأوسطين) ثم أربعة ترددات (يمين أعلى وأسفل).



شكل ٧-٤ بيانات من العالم الواقعى تؤيد النظرية. منحنى توزيع الترددات كما

استنبطه لبشابر من التجربة تبين ارتفاعات المقابلة للترددات، أما الاهتزازات الطفيفة فهى الشوشرة. يبين الشكل مع قيمة الترددات مقدار قوتها.

وكان **بيير هوهنبرج** Pierre Hohenberg من معامل AT& T Bell هو من جمع شمل المنظِّرين والتجريبيين. كان قد أنشأ ورشة عمل فى **أسبن** Aspen، حضرها لبشابر فى عام ١٩٧٩ (قبل ذلك بأربع سنوات استمع فيها فايجنباوم لسمول وهو يتحدث عن رقم، مجرد رقم، يلاحظه الرياضيون عند التحول إلى الهيولية فى معادلة ما). وحين تحدث لبشابر عن تجربته، أخذ هوهنبرج ملاحظات، قدَّمها فيما بعد إلى فايجنباوم، الذى قرر السفر إلى باريس للقاء لبشابر، حيث استمع منه عن تجربته، واستمع لبشابر منه عن نظريته. يتذكر لبشابر هذه الزيارة وكيف أنه اندهش لرؤية عالم تنظيرى بهذا الشباب وأيضا، بهذه الحيوية.

■ ■ ■

كانت القفزة من النظرية إلى الواقع العملى كبيرة، لدرجة أن الكثيرين من المشتغيلين بالموضوع كانوا ينظرون إليها كحلم. لم يكن واضحا بالمرة كيف يمكن للطبيعة أن تربط بين هذه الدرجة من التعقيد، وهذه الدرجة من البساطة. يقول جلوب: "إنها أشبه بالمعجزة، ليست مجّرد حادثة من حوادث توافق النظرية مع التجربة." وخلال عدة سنوات، تكررت المعجزة فى معامل لا حصر لها، فى أوعية أوسع من الماء والزئبق، وفى مذبذبات إلكترونية، وأجهزة ليزر، وحتى فى تفاعلات كيميائية. كانت النظريات تتبع تكنيك فايجنباوم، كما وجدت طرق أخرى للوصول للهيولية، **كالتقطع** intermittency **وشبه الدورية** quasiperiodicity، وكلها ثبتت عموميتها نظرياً وتجريبيا.

واكتشف التجريبيون قيمة الحاسوب فى إجراء التجارب، فهو ينتج نفس النتائج ولكن بسرعة فائقة وكفاءة عالية. كما أخرج فى نظم معقدة نفس الرقم الذى استبطه فايجنباوم فى نظامه البسيط. فى عام ١٩٨٠ أثبت فريق أوربى كيف يحدث ذلك رياضيا، فالتشتت الذى يستنفذ النظم المعقدة للحركات المتضاربة يجعل تصرفها يهبط بالتدريج إلى مستوى النظم وحيدة البعد.

وخارج الحاسوب، كان الحصول على الجاذبات الغريبة تحدياً صعباً، شغل عالماً مثل هارى سوينى إلى منتصف الثمانينات. ففى الحاسوب تجرى التجارب بمنأى عن

التشويش والضوضاء، بينما فى المعامل، وكذا فى الطبيعة، يلزم فصل المعلومات عن هذه الصور من التداخل.

على أن استخدام الحاسوب لا يخلو أيضا من نقاط ضعف فى مواجهة التجارب المعملية. **فنمذجة** الموضوع حاسوبيا عمل يقوم به المبرمجون، ويلجئون فى ذلك إلى تقطعة أوصال الحالة إلى أجزاء لإمكان تمثيلها حاسوبيا، وهنا تثور مسألة مدى تطابق النمذجة الحاسوبية مع الواقع. ويقول المنحازون للتجارب المعملية إن النمذجة الحاسوبية نوع من التنقيح المغالى فيه للحسابات، ولكنها لا تؤدى إلى اكتشافات حقيقية، فهذا سيظل على الدوام شرفا مقصوراً على المعمليين.

وقد ظل الكثيرون من الفيزيائيين يعتبرون أن تجربة لبشابر تنتمى للرياضيات أكثر من انتمائها للفيزياء، فالأنماط التى استنبطها كانت تجريدية، لا تقول شيئا عن خواص الهيليوم أو النحاس أو تصرُّف الذرات بالقرب من الصفر المئوي. لقد مهَّد لعالَم ما لبث غيره من المنهدسين والكيمائيين أن ارتادوه. كانت أنماطه دائما هناك، تلك التى استبطها عندما عزل التفرع الثنائى الأول، ثم الذى يليه والذى يليه، وهكذا. وطبقا للنظرية الجديدة فإن التفرع الثنائى من المفروض أن ينتج هندسة دقيقة للمقياسية، وهذا بالضبط ما رآه لبشابر، حيث تحول **رقم فايجنباوم** من رقم نظرى رياضى إلى حقيقة واقعة وملموسة. لم ينس أبدا الإثارة التى عايشها وهو يرى التفرع يتوالى أمام عينيه، ثم إدراك أنه يرى تتابعا لانهائيا، غاية فى الثراء. كانت، على حد قوله، لحظات غاية فى الإثارة.

---

i يمكن للتغذية الخلفية أن تكون إيجابية، حيث يعزز تأثير المخرجات من قيمة المدخلات، وهو ما يسبب الاهتزاز أو الاضطراب، كما يمكن أن تكون سلبية، فيكون تأثير المخرجات على المدخلات مضادا، وهذا النوع له أثر حميد فى استقرار النظم الديناميكية–المترجم

ii يلاحظ القارئ أننا ترجمنا Chaosهنا بالذات بفوضوية وليس بهيولية، ذلك لأن فكرة الهيولية لم تكن قد ظهرت علميا بعد، فاللفظ هنا يقصد به بالفعل فى هذا العنوان الفوضى التى كان الجميع لا يزالون إلى ذلك الحين يعتقدونها فى الظواهر الطبيعية – المترجم، وننوِّه هنا بما سيرد فى فصل لاحق عن عدم رضا الكثيرين عن إطلاق اسم chaosعلى هذا العلم، لما يثيره من مثل هذا اللبس، وهو نفس ما أخذناه على من أسماه بعلم الفوضى.

iii الترجمة الحرفية "السبب الفيزيائى" ولكنا نفضل الترجمة المبينة لسهولة التتبع. المترجم



صور الهيولية

قابل **ميشيل برانسلى** Michael Barnsley، رياضى واسع الثقافة من أوكسفورد، فايجنباوم فى مؤتمر بكوروسيكا عام ١٩٧٩، وهناك علم بنظرية **العمومية وتضاعف الفترات** والتسلسل اللانهائى للتفرع. فكرة رائعة، كفيلة بأن تجعل العلماء يهرعون إليها، أما عن نفسه، فكان يعتقد أنه قد رأى شيئا لم يلحظه أحد من قبل.

هذه المتتابعات لفايجنباوم، هذه الدورات؛ ٢، ٤، ٨، ١٦، من أين تأتي؟ هل تأتى كسحرٍ من فراغ رياضي، أم تراها تشير إلى ظل لشيء أكثر عمقا؟ إن بديهته تتجه إلى أن هذا يجب أن يكون جزءا من كائن فراكتلى مذهل، مختبئ عن الأنظار إلى درجة كبيرة.

كان لديه سياق معين لهذه الفكرة، مؤسسة على الفئة من الأعداد المسماة **"الأعداد المركّبة** comples numbers". وتختلف هذه الأعداد عن الأعداد العادية المألوفة لنا فى أن كل عدد منها مُركّب من عددين، الأول يُسمى الجزء الحقيقى real، والثانى يسمى الجزء التخيلى imaginary. وبينما يمكن تمثيل الأرقام العادية كنقطة على خط، كالمحور الأفقى أو المحور الرأسي، فإن الأرقام المركبة يجب أن تمثل كنقطة فى مستوى، ذات إحداثيين. وقد اصطلح على أن يكون المحور الأفقى هو الذى يمثل الجزء الحقيقي، والمحور الرأسى هو الذى يمثل الجزء التخيلي، كما اصطلح على أن يكون الجزء التخيلى عند كتابته مسبوقا بحرف ت (اختصار "تخيلي")، بينما يُميّز فى اللغات اللاتينية بالحرف) j (اختصار لكلمة "imaginary") للتمييز بينه وبين الجزء الحقيقي، مثلا: ٢+٣ ت. وفى هذا النظام تكون الأعداد الحقيقية هى حالة خاصة، أرقام مركبة جزؤها التخيلى يساوى الصفر، وتمثل بنقطة على محور السينات. وقد تصوّر برانسلى أن النظر إلى الأرقام العادية ذات البُعد الواحد فقط من شأنه أن يخفى أسرارا للأشكال من شأنها أن تظهر لو نظر للأرقام نظرة تشمل البعدين معا.

وقد كانت نشأة الأرقام التخيلية أساسا لحل المسألة: ما هو جذر مقدار سالب؟ نعلم أنه لا يوجد فى الطبيعة جذر لمقدار سالب، ببساطة لأن أى مقدار يضرب فى

نفسـه، سـواء أكان مـوجبا أو سـالبا، فـإن حـاصـل الضـرب مقـدار مـوجب. ولمـلء هذه الفـجـوة من وجـهـة نظر الرياضـيـات البـحـتـة، اصطُلح على أن جذر المقـدار السـالب هـو كميّة تخيلية (غير موجودة فى الطبيعة)، وبالتالى فإنه بينما نقول إن جذر ٤ هو ٢، فإن جـذر -٤ هو ٢ت. وبالمثل، فـحـين أن مـربـع الرقم الحـقـيـقـى الموجب (٢)٢ أو السـالب (-٢)٢ = ٤، فـإن مربع الرقم التخيلى الموجب (٢ت)٢ أو السالب (-٢ت)٢ = -٤. فـهى إذن وسيلة لحل المعادلات الرياضـية البحتة. والأرقام المركبة يمكن أن تجرى عليها كل العمليات الحسابية والرياضية المعتادة، شأنها فى ذلك شأن الأرقام الطبيعية.

وحين بدأ برانسلى فى ترجمة مـعادلات فايجنباوم إلى سياق الأرقام المركبة، بزغت له خطوط عامـة لمجمـوع مـن أشكال فـاتنة، تبـدو مـرتبطة بأفكار علمـاء فـيـزيـاء النظم الديناميكية، ولكنها أيضا تخلب اللب كتراكيب رياضية.

لقـد اتضـح له أن هذه الدورات ليست ناشـئـة من فـراغ بالمرة. فـهى تنتمـى للفـئـة الحقيقية من مستوى أرقام مركبة. فلو أنك نظرت مليّا، لوجدت تجمعات من الدورات، ثنائية، ثلاثية، رباعية، ...الخ. وهرع برانسلى إلى مكتبه فى معهد جورجيا للتكنولوجيا Georgia Institute of Technology، وكتب بحثا أرسله على جناح السـرعة إلى مـجلة الفيزياء الرياضيـة Mathematical Physics التى كان رئيس تحريرهـا فى هذا الوقت، وبمحض الصدفة، دافيد رول، ولم تكن استجابة رول مشجعة بالمرة. لقد أعاد برانسلى فى الواقع، ودون أن يدري، الكشف عن بحث قديم، يعود إلى ربع قرن مضـى، لرياضـىّ فرنسي. ويقول برانسلى متذكرا: "أعاد لى رول البحث كبطاطة ملتهبة، قائلا: "ميشيل، إنك تتحدث عن فئات جوليا."

كما أضاف رول نصيحة لبرانسلي: "اتصل بماندلبروت".

■ ■ ■

قبل ذلك بثـلاثة أعوام، كان **جون هبارد** John Hubbard يُدرِّس الرياضـيـات لطلاب السنة الأولى فى أورساى Orsay بفرنسـا. وكان ضمن منهجه الدراسى **طريقة نيوتن** الكلاسيكية فى حل المعادلات، عن طريق التجربة القائمة على التقريب المتتالى. وشعورا منه بالضجر، قرر أن يدرس هذه الطريقة بأسلوب جديد، يدفع طلاّبه للتفكير.

وطريقة **نيوتن** قديمة، بل مـوغلة فى القدم، فقد كانت معروفة من عـهد الإغريق، إذ اسـتـخدمـوها لإيجاد جـذور الأعداد. وتبدأ الطريقة بتـخمين إجـابة، وبحسـاب الخطأ

تجرى محاولة لتخمين أفضل، وهكذا يقترب الإنسان من الحل الصحيح عن طريق تكرار عملية **التقريب**. وهى عملية سريعة، حيث تتضاعف درجة التقريب فى كل مرة.

والجذور فى أيامنا هذه تستخرج بطريقة تحليلية بسيطة، ولهذا فحل المعادلات من الدرجة الثانية، وهى التى يكون فيها المجهول مرفوعا إلى القوة ٢، أمر يسير. وعلى ذلك فإن طريقة نيوتن تستخدم للمعادلات من درجات أعلى، والتى لا تُحل بطرق مباشرة. كما أن هذه الطريقة محبذة كثيرا فى وضع خوارزمات١ البرامج الحاسوبية، فعملية التكرار هى أولا وأخيرا مكمن قوة الحاسوب.

والشىء المزعج فى تطبيق طريقة نيوتن أن حل المعادلات الجبرية له أكثر من إجابة. والإجابة التى سوف يتجه إليها تطبيق طريقة نيوتن تعتمد على التخمين الأولي. وإذا ما وجدت أن تخمينك الأولى سوف يؤدى بك إلى غير إجابة، فعليك أن تبدأ من موضع آخر. ومن البديهى أن يزداد تطبيق الطريقة تعقيدا كلما ازدادت درجة المعادلة. وهذا ما وعد هبارد طلابه فى التفكير فيه.

فبالنسبة للمعادلة من الدرجة الثالثة، والتى لها ثلاثة حلول، فإن التفكير فى المسألة هندسيا يوحى بتقسيم مستوى الإحداثيات إلى ثلاثة قطع، كل قطعة تحتوى على أحد الحلول. ولكن هبارد اكتشف أن أشياء غريبة تحدث عند الحدود. كما اكتشف أيضا أنه ليس أول من فكر فى ذلك، فقد سبقه بعض علماء القرن التاسع عشر، ولكنه يتفوق عليهم بأن تحت يديه وسيلة لم تكن متاحة لهم، ألا وهى الحاسوب.

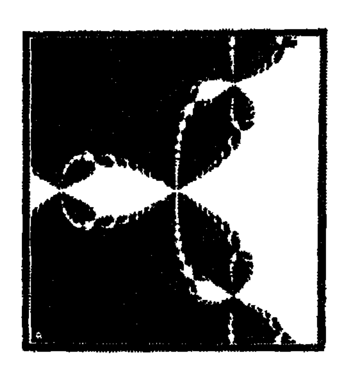
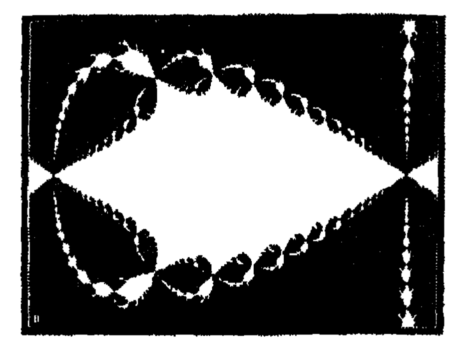
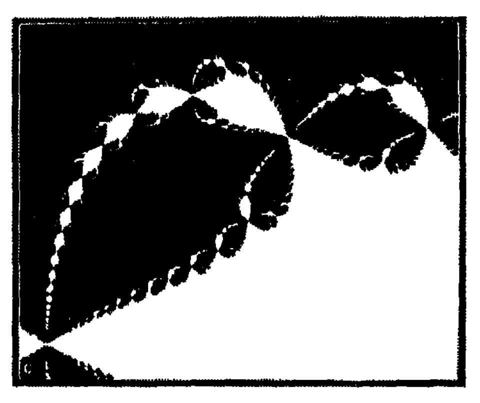
كان هبارد من الرياضيين الذين يكرهون التخمين، ويفضلون البرهان الحاسم. وقد كان مُصراً، بعد عشرين عاما من دخول **جاذب لورنز** الكتابات العلمية، أنه ما من برهان حاسم على أن هذه المعادلات تؤدى بالفعل إلى جاذب عجيب، فالأمر ليس إلا تصورًا يعوزه البرهان. إن الحلزون المزدوج ليس برهانا، بل مجرد شيء رسمه الحاسوب.

والآن، بدأ هبارد رغما عن نفسه فى عمل ما لم يعمله الرياضيون التقليديون. إن الحاسوب لن يبرهن شيئا، ولكنه على الأقل قد يكشف القناع عن حقائق توضح للرياضى ما هو بصدد برهنته. وهكذا بدأ تجربته. وهو قد عالج طريقة نيوتن ليس كطريقة لحل المسائل، بل كمسألة قائمة بذاتها. ونظر فى أبسط معادلة من الدرجة الثالثة، $س^{٣}-١$=صفر، وهى تعنى ببساطة إيجاد الجذر التربيعى للعدد ١ فى فئة الأعداد الحقيقية، الحل هو ١ ولكن فى فئة الأعداد المركبة، فإن للمسألة ثلاثة حلول،

إذا رسمت بيانيا، فإن الحل الأول يقع على الخط الأفقى (الحل الحقيقى) ثم يكون كل حل من الحلين الآخرين على زاوية ١٢٠ درجة مع المحور الأفقي، والحلول الثلاثة على محيط دائرة مركزها نقطة الأصل. والآن، فإذا بدأنا برقم مركب معين، فإلى أى حل سوف تقودنا طريقة نيوتن؟ تبدو المسألة كما لو كانت طريقة نيوتن نظاما ديناميكياً، وكل حل من الحلول يمثل جاذبا. أو كما لو كان المستوى الإحداثى سطحاً به ميول تؤدى لثلاثة وديان، ولو وضعت كرة على موضع منه وتركت لتتدحرج، فسوف تنتهى إلى أحد تلك الأودية.

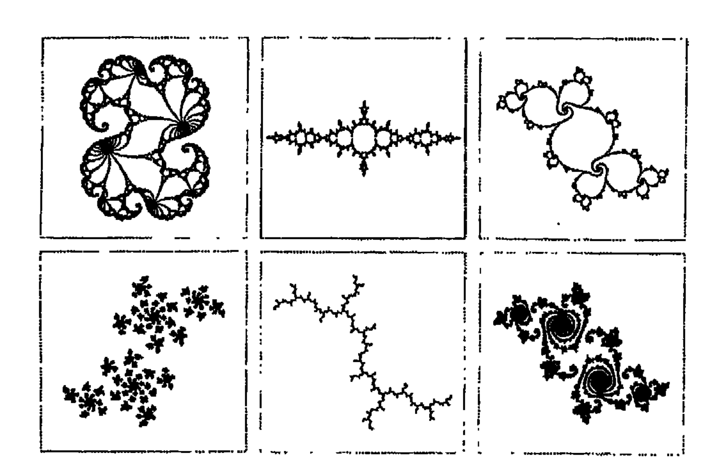
وجعل هبارد حاسوبه يمسح نقاط مستوى الإحداثيات، ليحسب تدفق طريقة نيوتن لكل نقطة، ثم أعطى للنتائج ألوانا؛ النقطة التى سوف تؤدى للحل الأول نقطة زرقاء، والتى تؤدى للثانى حمراء، وللثالث خضراء. وعند أدنى درجة من **التقريب**، وجد هبارد أن ديناميكية طريقة نيوتن تقسم المستوى بالفعل ثلاثة قطع. فبصورة عامة، النقاط التى تجاور حلا معينا تؤدى إليه. ولكن نوعا من التنظيم الداخلى المعقد قد كشف عنه الحاسوب، لم يكن ليخطر ببال رياضى من قبل. فبينما أدت بعض النقاط إلى الحل بسرعة وسلاسة، فإن البعض الآخر منها قد أخذ يتراقص عشوائيا قبل أن يتقارب إلى حل معين. أحيانا أخذت بعض النقاط تدور فى دورات منغلقة، بدلا من التقارب لحل ما.

وحينما دفع هبارد بحاسوبه إلى دقة أكثر فأكثر فى إظهار التفاصيل، ذُهل مع طَلبته من الأشكال التى أخذت فى الظهور. فبدلا من وجود حد واضح بين الأحمر والأزرق مثلا، ظهرت بقع من اللون الأخضر عند خط الحدود بين اللونين، متّصلة ببعضها البعض كعقد من اللؤلؤ. كان ذلك أشبه بوقوع الكرة فى تأرجح بين واديين، فإذا بها تنتهى ليس إلى واحد منهما، بل إلى الوادى الثالث. لم يتكون قط حدٌ فاصل بين لونين. فعند قدر أكبر من التفصيل، اتضح أن منطقة تلاقى البقعة الخضراء الدخيلة مع الأزرق، تحتوى على بقع حمراء، ومع الأحمر تحتوى على بقع زرقاء وهكذا؛ لقد أظهرت الحدود أخيرا لهبارد خاصية مميزة، محيّرة حتى لشخص على دراية ***بأشكال مندلبروت الفظيعة؛ لا توجد نقطة قط تعمل كفاصل بين منطقتين لونيتين***. فى أية نقطة يود لونان التقارب عندها، يقحم اللون الثالث نفسه، بنمط يكرر نفسه فى تماثل ذاتى على الدوام. إن أية نقطة تلاقٍ تتحول، وبصورة تبدو مستحيلة، إلى منطقة تحتوى على الألوان الثلاثة.

شكل ٨-١ حدود بتعقيد لانهائى. حين تقطع فطيرة ثلاث قطع، فإنها تتلاقى فى نقطة واحدة، وتكون الحدود بين أية قطعتين بسيطة. ولكن عمليات كثيرة للرياضيات البحتة وكذا فى العالم الواقعى تنتج حدودا بدرجات من التعقيد لا يتصورها عقل.

فى أعلى الصورة، طريقة نيوتن مطبّقة لإيجاد الجذر التكعيبى للعدد ١، وهو يقسم المستوى إلى ثلاثة مناطق متطابقة، أحدها مصورة باللون الأبيض. ٢ كافة النقاط البيضاء "تنجذب" إلى الجذر الذى يقع فى أقصى منطقة بيضاء، بينما تنجذب النقاط السوداء إلى أحد الجذرين الآخرين. الحدود لها تلك الخصيصة المتميزة، وهى أن كل نقطة عليها تقع بين المناطق الثلاثة. وتبين الصور الثلاث، والمتدرجة فى التكبير، أن تكبير أية منطقة يكشف عن هيكل فراكتلي، يكرر النمط الأصلى على مقياس أصغر فأصغر.



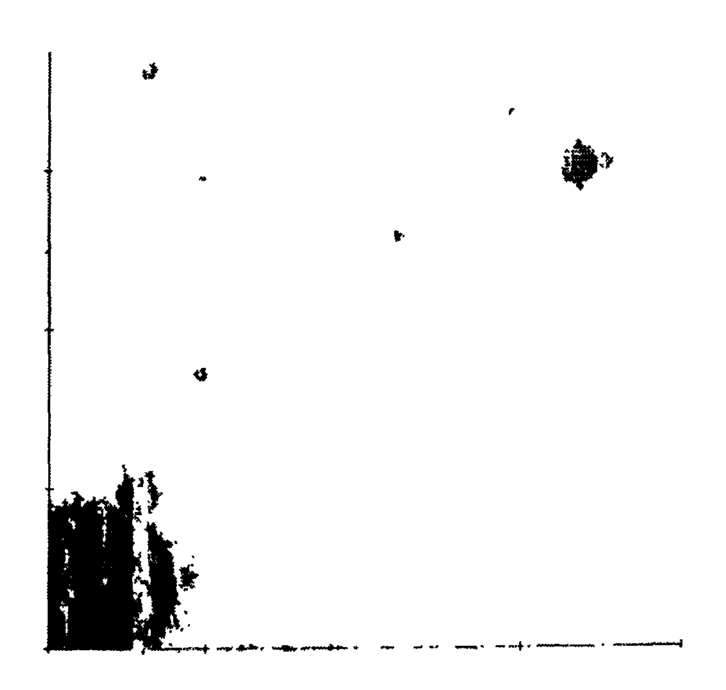
شكل ٨-٢: تصنيف فئات جوليا

انكبَّ هبارد على دراسة هذه الأشكال المعقدة ومضامينها على الرياضيات. وأصبح عمله وعمل زملائه في نفس الموضوع خطا جديداً في اقتحام مشكلة النظم الديناميكية. لقد شعر أن وضع خرائط لطريقة نيوتن ليست إلا واحدة من عائلة لم تكتشف بعد من الصور التي تعكس تصرف القوى في العالم الواقعي. وكان ميشيل برانسلي يبحث عن عناصر أخرى من العائلة. أما بنوا ماندلبروت، وكما علما فيما بعد، فقد كان يبحث في الجد الأعلى لهذه العائلة، فيما أصبح معروفا في العالم بأسره باسم فئة ماندلبروت Mandelbrot set.

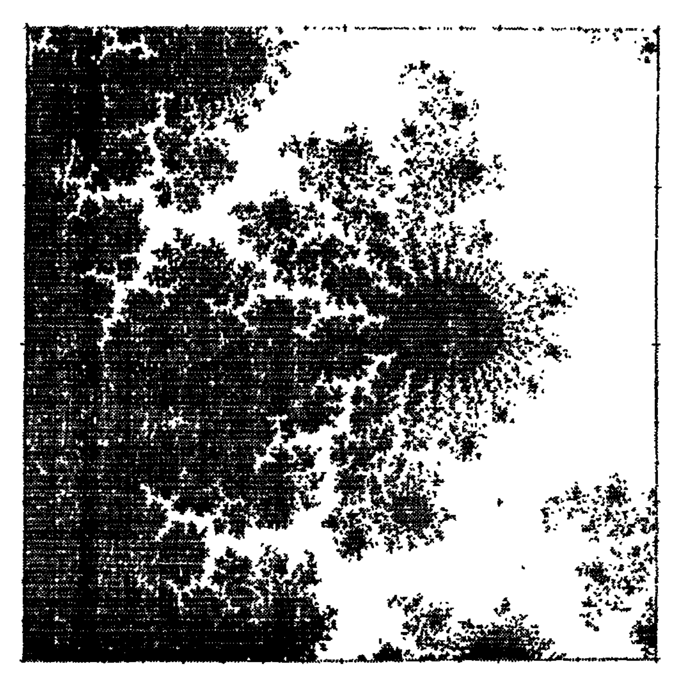
■ ■ ■

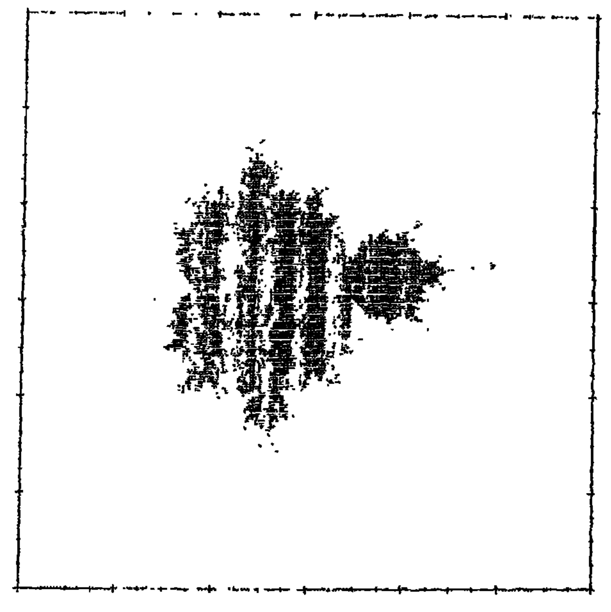
إن فئة ماندلبروت هي أعقد شيء في علم الرياضيات على الإطلاق، هذا ما يقرره على الدوام المغرمون بها، فعمر الكون قد لن يكون كافيا للكشف عنها بالكامل، بأقراصها ذات النتوءات الحادة، وحلزوناتها وفتائلها الملتفة حول بعضها البعض أوالمتشعبة للخارج، تتدلى منها حبيبات مبرقشة بألوان لا تنتهي، كعناقيد عنب في حديقة ربانية. وينبئ الفحص الدقيق لأجزاء هذه الفئة عن أشكال أكثر فراكتلية من الفراكتلات ذاتها، غاية في الثراء في تعقدها كمّاً زادت المقاييس دقة. ويتطلب تصنيف الصور المختلفة داخلها أو الوصف الرقمي لحدودها كما لانهائيا من المعلومات. ولكن هنا مكمن التناقض؛ فلإرسال الوصف الكامل للفئة عبر خط اتصال حاسوبي لا يتطلب الأمر سوى بضع عشرات من المحارف[iii]، فيمكن لبرنامج

حاسوبى مقتضب أن يتضمن معلومات وافية لإنتاج الفئة بأكملها. وقد فاجأ هذا التناقض بين التعقد الهائل والبساطة البالغة كل من تعرض لهذه الفئة بالدراسة، بما فيهم ماندلبروت نفسه. ولقد أصبحت هذه الفئة هى الشعار الشائع للهيولية، فتراها على أغلفة الكتب والكتيبات والمجلات التى تتعلق بالموضوع، وأصبحت حجر الزاوية لمؤتمر عالمى للفنون الجميلة الحاسوبية عقد عامى ١٩٨٥-٨٦،. إن جمالها كان سهلا الإحساس به من هذه الصور، صعبا فهمه على الرياضيين الذين أخذوا يستوعبون مضمونها ببطء.



شكل ٣-٨ بزوغ فئة ماندلبروت: فى إخراج الحاسوب المبدئى لفئة ماندلبروت، يظهر شكل غير واضح الملامح، تزداد ملامحه وضوحا كلما أغرق الحاسوب فى إجراء الحسابات. هل هذه "الجزيئات" الطافية الشبيهة بحشرة البق جزر منعزلة، أم تراها تنجذب إلى الشكل الأصلى بواسطة عناصر أدق من أن ترى؟ من المستحيل الرد على هذه الأسئلة فى الوقت الحالى.







والكثير من الأشكال الفراكتالية يمكن إنتاجها عن طريق التكرار فى مستوى الإحداثيات للأعداد المركبة، ولكن فئة ماندلبروت هى فئة وحيدة لا يوجد غيرها. لقد بدأت فى الظهور، غامضة شبحية، حين حاول ماندلبروت أن يجد وسيلة لتعميم فئة من الأشكال تعرف باسم فئات جوليا Julia set، درسها خلال الحرب الأولى اثنان من الرياضيين؛ **جاستون جوليا** Gaston Julia و **بيير فاتو** Pierre Fatou. وقد قرأ ماندلبروت عنها ودرس أشكالها المتواضعة، والغامضة، حين كان فى العشرين من عمره. كانت هذه الفئة، مع شيء من التخفي، هى ما فتن برانسلي. بعض أشكال هذه الفئة أشبه دوائر خرقت وشوهت فى عدة أماكن لتنتج أشكالا فراكتالية، وبعضها الآخر مقسّم على مناطق، والبعض الآخر أشبه بغبار متناثر، ولكن الهندسة الإقليدية لا تحمل كلمات أو مفاهيم تفى بوصفها. ويصفها الرياضى الفرنسى أدريان دودى Adrien Douady بقوله: "إنك تحصل على أشكالها الغريبة، البعض سحب متكاثفة، والبعض الآخر نباتات عشبية من العليق، وغيرها شرارات كتلك التى تتخلف بعد الألعاب النارية، وأحد هذه الأشكال على هيئة أرنب، والعديد منها على شكل ذيل فرس البحر."

وقد اكتشف **ماندلبروت** عام ١٩٧٩ أنه بإمكانه خلق شكل فى المستوى المركب يمكن أن يفي بغرض تصنيف تلك الفئة، كدليل لكل شكل ولكل إنسان. كان يبحث تكرار معادلات كثيرة، تحتوى على جذور تربيعية وجيوب وجيوب تمام. ورغم ما حققه لنفسه من شهرة فى وضع مفهوم البساطة المؤدية إلى التعقيد، فإنه لم يفهم وقتها مدى غرابة الشكل الذى يحوم تحت شاشة حاسوبه. وقد ضغط برامجه لدرجة أعلى من التفاصيل، وأجهدها فى العمل على ذاكرة كانت على وشك النضوب بالفعل، وشاشة بدائية غير ملونة. ومما زاد الأمر سوءا، ما يحدث من تأثير لأخطاء الحاسوب نفسه على الأشكال الحادثة.

ثم وجه ماندلبروت اهتمامه إلى **تطبيق**[iv] mapping بسيط كانت برمجته سهلة بصورة خاصّة. وعند درجة فجة من الدقة بدأت ملامح أقراص تظهر، وبحسابات بسيطة بالقلم بدا أنها حقيقية رياضية، وليست عشوائيات حسابية. وإلى اليمين واليسار من الأقراص، ظهرت علامات تنبئ عن أشكال أخرى. وقد قال فيما بعد أنه رأى بعين الخيال تدرّجا من أشكال، كذرات تنتج ذرات وهكذا بلا نهاية. وكلما تقاطعت الفئة مع خط الأعداد الحقيقية، تولدت الأشكال التالية من الأقراص بمقاييس رسم أصغر وبانتظام هندسى أصبح معروفا لعلماء النظم الديناميكية، إنها متواليات التفرعات لفايجنباوم.

وشجّعه ذلك أن ينزع لدرجة أعلى من الدقة، وعلى الفور لاحظ شوائب عالقة بأحرف الأقراص، وأيضا متطايرة فى الفضاء المجاور. وحينما حاول الحساب بدرجات أدق، أحس فجأة بأن طالعه الحسن قد فارقه. فبدلاً من أن تصبح الأشكال أكثر تحديداً، بدت أكثر تشوشا. وعاد إلى حاسوب شركة أى بى إم محاولا مع قدرة حاسوبية أكبر من المتاحة لدى حاسوب هارفارد. ولدهشته أفصح التشوش عن شيء حقيقي. براعم وفريعات تتفرع عن القرص الأصلي، ورأى ماندلبروت ما كان يشبه حداً فاصلا يكشف عن نفسه كحلزونات أشبه بذيل حصان البحر.

إن فئة ماندلبروت هى مجموع من النقاط، وكل نقطة على المستوى المركب، أى كل عدد مركب، يكون إما فى الفئة أو خارجها، ويتحدد ذلك طبقا لاختبار يجرى على النحو التالي: خذ العدد المركب، ارفعه للأس ٢، أضفه للعدد الأصلي، ارفع الناتج للأس ٢، وهكذا. فإذا كانت نتيجة التكرار ترتفع باطّراد إلى مالا نهاية، فالنقطة ليست من نقاط الفئة، أما إذا ظلت النتيجة عددا محدودا، كأن تقتنص فى دورة متكررة، أو تتأرجح عشوائيا، فإنها تكون من نقاط الفئة.

فى حالة الأعداد الطبيعية، لا يمثل اختباراً كهذا أية معضلة، فالأعداد الأكبر من الواحد الصحيح سوف تتصاعد إلى مالا نهاية، والأقل من الواحد الصحيح (الأعداد الكسرية) سوف تؤول فى النهاية إلى الصفر. ولكن الأمر ليس بهذه السهولة مع الأعداد المركبة، فمعرفة الدالة ليس دائما مفيدا فى توقع الشكل الناتج عن التكرار. لا مناص إذن من أسلوب التجربة والخطأ، وهذا يجعل المستكشفين لهذه الأرض الجديدة أقرب لروح ماجلان عن روح إقليدس.

إن وضع هندسة جديدة يكون عن طريق تغيير إحدى بديهيات الهندسة القديمة، إفترض أن المستوى كروى وليس مسطحا، أو أن الأبعاد أربعة أو خمسة أو أكثر، بدلا من ثلاثة، أو أن عدد الأبعاد كسرى وليس صحيحا، لنفرض أن الأشكال قابلة للمط واللى والعقد. وأخيرا، لنفرض أن الأشكال لا تعرف عن طريق دوالها، بل عن طريق تكرار عملية التغذية الخلفية.

جوليا، فاتو، هابارد، بارنسلي، ماندلبروت، هؤلاء الرياضيون قد غيّروا طريقة رسم الأشكال الهندسية. ففى الهندسة الإقليدية والكارتيزية، يُعبّر عن كل شكل عن طريق دالته الرياضية. فالدالة س ٢+ ص٢ =١ تعبر عن دالة قطرها الوحدة، ومركزها نقطة الأصل. وهناك دوال للتعبير عن الأشكال الأخرى، القطع الناقص والقطع المكافئ والقطع الزائد، وأشكال أعقد من ذلك تنتج عن معادلات تفاضلية. ولكن حين يلجأ الرياضى للتكرار لمعادلة ما بدلا من حلها، فإن المعادلة تصبح **عملية *process***، وليس وصفا، أى ذات طبيعة ديناميكية وليست استاتيكية. وحين يدخل رقم فى المعادلة، يخرج رقم آخر، ويدخل ثالث، وهلم جرا. والنقاط تسجل ليس حين تحقق المعادلة، بل حين تنتج تصرفا معينا. وقد يكون التصرف هو حالة مستقرة، أو تكرار ترددي، أو انطلاق غير محكوم إلى اللانهاية.

وقبل ظهور الحاسوب لم يكن باستطاعة جوليا وفاتو، وهما من فهما هذه الإمكانية لتوليد الأشكال، تأسيس هذا العلم. ولما كان الحاسوب قادراً على تنفيذ الأعمال التكرارية بسهولة، فإن عملية التجربة والخطأ أصبحت مُيّسرة، وهو ما استغله **هابارد** فى فحص **طريقة نيوتن، وماندلبروت** فى اكتشاف ملامح فئته.

وحين رضى هابارد عن هذا الأسلوب الجديد فى استكشاف الأشكال بواسطة الحاسوب، أخذ على كاهله أن يتحمل تطبيق أسلوب رياضى مستحدث، وهو أسلوب **تحليل الأعداد المركبة**، وهو فرع من الرياضيات لم يطبّق من قبل على النظم الديناميكية. كان يشعر بأنه قد آن الأوان للم شمل النظم المختلفة من العلم، وأن

المجالات المختلفة تتلاقى. إنه يعلم أنه ليس كافيا أن يشاهد أشكال فئة ماندلبروت، بل يجب أن يفهمها أولا، وفى النهاية، ادعى أنه قد فعل.

لو أن الحدود كانت مجرّد أشكال فراكتالية بالصورة التى عرفها بها ماندلبروت، لكان كل شكل تكرار تصغير للسابق عليه، تطبيقا لمفهوم التماثل الذاتي. ولكن على النقيض من ذلك، يظهر كل اقتحام لعمق أشد غورا الجديد من المفاجآت. وقد بدأ ماندلبروت يراجع نفسه إن كان قد وضع تعريفا خاطئا لأشكاله. كانت فئته تظهر بالفعل أشكالا متطايرة تبدو نُسَخاً من الأصل الذى انبعثت منه، ولكن التدقيق فيها كان يبيّن أن التطابق ليس تاما، حيث يظهر على الدوام أشكال جديدة من ذيل حصان البحر، وأنواع من عشيبيات ملتفة جديدة. الواقع أنه ما من شكل يتطابق مع آخر، مهما بلغت درجة التكبير.

على أن الأشكال المتطايرة أثارت على التو مشكلة. هل أشكال هذه الفئة مترابطة، كقارة ذات امتدادات فى البحر، أم أنها كالغبار المتطاير حول جسم ما؟ لم يكن الأمر واضحا على الإطلاق. ولم تكن فئات جوليا لتقدم أى جواب على السؤال، لأن أشكالها تأتى على الوجهين، منها ما يمثل ذلك ومنها ما يمثل ذاك. ووجد ماندلبروت أن حاسوبه عاجز عن أن يقدم الإجابة. وركز النظر على الأشكال الدقيقة المتطايرة، لقد بدت منفصلة عن أصلها، ولكن الاحتمال قائم فى وجود خطوط للوصل بينها تخطئها العمليات الحسابية.

وقد استخدم **دودى** و **هبارد** سلسلة بارعة من الرياضيات الحديثة لإثبات أن كل جزيئية متطايرة لها ارتباط بأصلها. كما أثبتا أنه ما من جزء متطاير إلا ويترك آخر مكانه، شبيها له، ولكن ليس فى تطابق تام، وأن كل جزء جديد ينشأ محاطا بخطوط اتصاله المتشعبة، تحمل فى نهاياتها براعم الأشكال الجديدة. يالها من معجزة فى عالَم التصغير اللامتناهى!

■ ■ ■

قال **هاينز-أوتو بايتجن** Heinz-Otto Peitgen متحدثا عن الفن: " كان كل شيء فى الفن هندسيا للغاية، فأعمال جوزيف ألبرز مثلا كانت مربّعات متداخلة، الهدف منها إجراء تجارب لونية، وقد شاعت وقت ظهورها، ولكن لم يعد أحد يحبها اليوم. والآن، لم تعد البنايات النمطية ترضى الأذواق فى ألمانيا. يلوح لى أن هناك سببا عميقا لذلك. إن المجتمع يكره اليوم بعض تصوّراتنا عن الطبيعة. إن الحماس الطاغى الذى نقابله اليوم

له علاقة بالمنظور المختلف للطبيعة، والمضمون الحقيقى للأشياء الطبيعية. خذ الشجرة مثلا، ما مضمونها، أخط مستقيم، أم أشكال فراكتالية؟"

كان بايتجن يتحدث إلى زائر ليساعده على اختيار لوحة من لوحات فئة ماندلبروت أو فئات جوليا أو غيرها من إنتاج العمليات التكرارية المعقدة. وكان فى مكتبه بكاليفورنيا يعرض شرائح، وملصقات، بل ونتيجة حائط لأشكال ماندلبروت. وفى نفس الوقت فى كورنل، كان جون هبارد يكافح لتلبية مئات الطلبات لهذه الصور. لقد أدرك أن عليه أن ينتج عيّنات وقائمة أسعار لها لمواجهة الطلب المتزايد. وكانت الصور قد صنفت بالفعل وخزنت فى الحاسوب، استعدادا للإرسال الفوري. ولكن أدق وأجمل الصور كانت تأتى من اثنين ألمانيين، هاينز-أوتو بايتجن وبيتر ريختر Peter Richter، والطاقم المساعد من علماء جامعة بريمين، ومعاونة متحمسة من بنك محلى.

وجّه بايتجن وريختر، أحدهما رياضى والآخر فيزيقي، نشاطهما إلى فئة ماندلبروت. كانت تمثل عالما من الأفكار بالنسبة لهما؛ فلسفة حديثة للفن، تبرير لاستخدام الأسلوب التجريبى فى الرياضيات، ووسيلة لتقديم النظم المعقدة للجماهير. طبعا الكتب والكتالوجات، ورحلا إلى مختلف بقاع الأرض مع مجموعة من صورهم الحاسوبية، كان ريختر قد تحول إلى النظم المعقدة من الفيزياء، عبر الكيمياء ثم الكيمياء الحيوية، يدرس الاهتزازات فى البيولوجيا. وخلال عدة أبحاث نشرها عن نظام الوقاية فى الجسم، وتحوّل السكر إلى طاقة عن طريق الخمائر، وجد أن الاهتزازات كثيراً ما تحكم عمليات كان ينظر إليها على أنها استاتيكية. كان يحتفظ فى مكتبه لنموذج من بندولين، يطلق عليه نظامه الديناميكى الأليف، يحلو له بين الحين والآخر أن يدخله فى الطور الهيولي، حيث تظهر فيه مدى الحساسية للظروف الأولية لدرجة أن بعض قطرات المطر على النافذة المعلق عليها تؤثر على حركته. وكانت الصور الملونة لفضاء الطور لنموذجه تبين اختلاط الحركة الدورية بالهيولية، كما كان يستخدم نفس التكنيك الرسومى لبيان مغنطة المواد، وكذا لاستكشاف أشكال فئة ماندلبروت.

وبالنسبة لزميله بايتجن كانت دراسة التعقيد فرصة لوضع تقاليد جديدة فى العلم بدلاً من مجرد حل المسائل. ويقول عن ذلك، على أساس أن المجال الجديد سيكون غير نمطي: "فى مجال جديد تماما، يمكنك أن تفكر بحرية مطلقة، وقد تأتى بحلول جديدة فى أيام أو أسابيع أو شهور قليلة. أما فى المجالات التقليدية، فكل شيء معروف: ما كشف عنه، ومالم يكشف عنه بعد، وما حاول البعض كشفه ولم يؤد إلا إلى طريق

مسدود. عليك أن تتعامل مع مسألة معروفة على أنها تمثل مشكلة وأنها تستحق الدراسة، وإلا كتب عليك الضياع. وبالنسبة لما عرف أنها مشكلة، فيجب أن تكون صعبة، وإلا لكانت حلّت بالفعل."

وبطبيعة الحال شعر بايتجن كما شعر غيره من الرياضيين ببعض القلق حول استخدام الحاسوب كأداة للتجريب فى مجال الرياضيات، والذى قوامه التقليدى هو النظرية والإثبات. فما يظهر على شاشة الحاسوب لا يمثل ضمانا بأنه يخضع إلى لغة الرياضيات هذه. ولكن من جهة أخرى، فإن مجرد إتاحة مثل هذه الصور يعتبر كافيا لتطور علم الرياضيات. ومن رأى بايتجن أن الاستكشافات الحاسوبية قد أعطت الرياضيين الحرية فى اتباع طرق أكثر طبيعية. فعلى الرياضى أن يضع مؤقتا قضية البرهان جانبا، وأن يتبع الاستكشاف فى أى مسار يتخذه، بالضبط كما يفعل الفيزيائي. إن القدرة التحليلية الرقمية للحاسوب، وما تقدمه الصور الحاسوبية من إلهامات، إمكانيات تعد بمسارات رحبة للرياضيين، تتلافى الطرق المسدودة. وبعد أن يستخلص الرياضى من ذلك ما يشاء، يمكن له ، أو لغيره، أن يعود لقضية الإثبات، أو ربما يتاح ذلك فى جيل تال. الإثبات قضية جوهرية فى الرياضيات، نعم، ولكن ليس إلى الحد الذى يجعلنى أتخلى عن شيء الآن، لمجرد عدم مقدرتى على إثباته."

بحلول الثمانينات، أصبح الحاسوب الشخصى قادراً على القيام بالعمليات الحسابية بدقة تتيح إنتاج الصور الملونة للفئة، الأمر الذى استهوى العديد من الهواة، إذ انفتحت أمامهم إمكانات هائلة للدقة. فإذا كان الشكل على مستوى كوكب فى أبعاده مثلا، فإنه بإمكانك أن تنتج له صورة على هذا المستوى، أو على مستوى قارة، أو دولة، أو مدينة، أو منزل، أو غرفة، أو منضدة، أو كوب ماء، أو قطرة ماء، أو جزيء من الماء، أو بحجم بكتيريا، أو بحجم ذرة. وكل مستوى يبدو متشابهاً مع المستوى الأعلى، ولكن التشابه ليس تاما. وكل المستويات تنتج بعدد محدود من أسطر البرامج الحاسوبية.

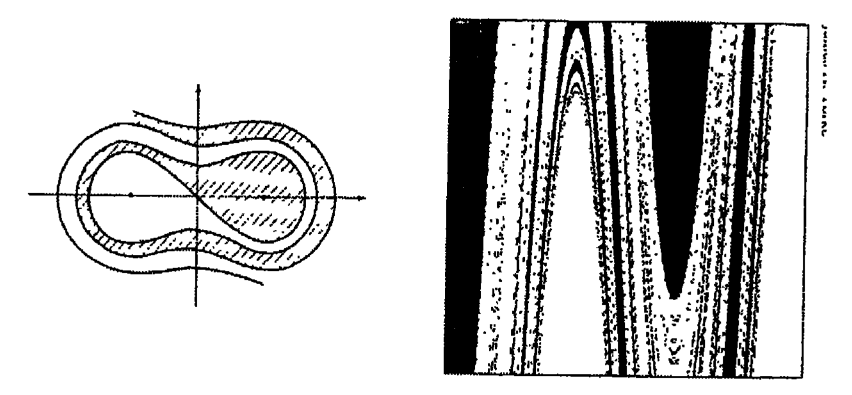
■ ■ ■

فى **فئة ماندلبروت**، يقضى الحاسوب أكثر وقته عند **الحدود** فى إجراء الحسابات والتقريبات. فهناك، وبعد مائة، أو ألف، أو عشرة آلاف من التكرار، يظل غير متأكد من أن النقطة لا تنتمى للفئة، فمن يدرى ما الذى تنتجه الدورة المليون من الحساب؟ ولذا فإنه كلما كبرت درجة الدقة، كان الاحتياج إلى قدرة أكبر من الحاسوب. وبعد مرحلة معينة، يكون الاحتياج إلى حواسب فائقة القدرة، تعتمد على المعالجات المتعددة،

كالحاسبات الإيوانية mainframe أو محطات العمل workstations، والتى تعادل آلافا من العقول البشرية تعمل مجتمعة فى إجراء نفس الخطوة. وعند الحدود توجد دائما النقاط التى تفر من قبضة الفئة، فهى أشبه بمن وقع تحت تأثير جذب لقوى متعادلة، تفشل أى منها فى جذب النقطة إليها.

وحين يتحرك العلماء من فئة ماندلبروت ذاتها إلى تمثيل الظواهر الفيزيائية، تبرز خصائص الحدود إلى المقدمة. فالحدود بين جاذبين أو أكثر فى نظام ديناميكى تمثل منطقة عامة يبدو أنها تحكم العديد من الظواهر، من تحطم المواد إلى اتخاذ القرارات. كل جاذب فى هذه النظم له حوض، كالنهر الذى يلقى كل ما استطاع حمله إلى حوضه أو مصبّه. وتوجد بين أحواض الجاذبات حدود مشتركة. وفى الثمانينات، كانت أهم الأبحاث وأكثرها تأثيرا على الخط العلمى فى الرياضيات والفيزياء هى دراسة الخصائص الفراكتلية فيما بين الحدود.

هذا الفرع من الدراسات الديناميكية لا يهتم بالحالة النهائية للنظام، بل بالطرق التى تتخذها النظم فى الاختيار بين البدائل. فنموذج لورنز، الذى غدا كلاسيكيا، له جاذب وحيد، تصرف وحيد حين يستقر النظام، وهو جاذب هيولي. وقد تستقر بعض النظم على حالة غير هيولية، بل حالة ثابتة، قد يكون هناك احتمال لأكثر من حالة ثبات، يمكن للنظام أن يستقر عليها. ودراسة الخصائص الفراكتلية عند الحدود هى دراسة للنظم التى يمكنها أن تستقر على أكثر من تصرف ثابت، أى غير هيولي، وكيفية التنبؤ بالتصرف الذى سوف يستقر عليه النظام.



شكل ٨-٣ أحواض الحدود الفراكتلية: حتى وإن كان تصرف النظام الديناميكى على المدى الطويل ليْس هيوليا، فإن الهيولية يمكن أن تظهر فى الحدود بين حالة ثبات

والأخرى. فالنظم الديناميكية لها عادة أكثر من حالة اتزان، كالبندول الذى يمكنه أن يستقر عند أى من مغناطيسين موجوين على قاعدته. فكل وضع توازن يعتبر جاذبا، والحدود بين هذه الجاذبات يمكن أن تكون معقدة، ولكن فى سلاسة (يسار). كما يمكن أن تكون الحدود معقدة فى غير سلاسة، فالتداخل الفراكتلى شديد التعقد للونين الأبيض والأسود (يمين) هو شكل فضاء الطور لبندول. ومن المؤكَّد أن النظام سوف يصل لحالة ثبات، وبالنسبة لبعض المواضع الابتدائية فإن موضع الاستقرار يكون متوقعا، الأبيض يؤول للأبيض والأسود للأسود، ولكن عند الحدود يكون التوقع مستحيلا.

وقد اقترح **جيمس يورك**، الرائد فى دراسات الخصائص الفراكتلية عند الحدود بعد عقد من إعطائه علم الهيولية اسمه الرسمي، نظاما لآلة تخيلية، تحتوى على كبّاس ذى زنبرك. يقوم اللاعب بسحب الكباس ثم إطلاقه، فيدفع بكرة على مجرى مائل إلى أحد مخرجين.

هذا **نظام تحديدي**، ليس له إلا عامل واحد يحدد النتيجة – إلى أى مخرج تتجه الكرة – وهو الوضع الابتدائى للكباس. لو تصورنا أن السحب لأقل من مسافة معينة يؤدى للمخرج الأيمن، ولأكثر من مسافة معينة يؤدى للمخرج الأيسر، فإن السحب لمسافة تقع بين المسافتين سوف يجعل تصرف الكرة فى اختيارها لأى من المخرجين معقدا.

لنفرض أننا مثّلنا النتائج رسوميا، على هيئة نقاط ملونة بحسب المخرج الذى تنتهى إليه، ما ينتهى إلى اليمين أخضر، وإلى اليسار أحمر. ما الذى نتوقع أن نجده عن هذين الجاذبين بمعرفة الوضع الابتدائى؟

تظهر الحدود كفئة فراكتلية، ليست بالضرورة متماثلة ذاتيا، بل تستمر تفاصيلها إلى مالا نهاية. بعض المناطق تكون ملونة بلون أحمر خالص أو أخضر خالص، وفى مناطق أخرى، عند تكبيرها، تظهر لونا أحمر وسط مناطق خضراء، أو العكس. فى بعض المناطق لا يكون للتغير فى وضع الكباس أثر، وفى مناطق أخرى يكون لأدنى تغير أثره فى التحول من الأحمر للأخضر

إن إضافة بعد ثان للنظام يعنى إضافة معامل آخر، درجة ثانية من الحرية. وفى لعبتنا التخيلية سنجعل العامل الثانى هو ميل المجرى. هنا سندخل فى صورة من التعقيد تمثل كابوسا للمهندسين المسئولين عن استقرار النظم التى تحتوى على أكثر من معامل استقرار، كالشبكات الكهربائية مثلا، أو محطات المفاعلات النووية، وكلا المجالين كان موضع دراسات مكثفة عن الهيولية فى الثمانينات.

عقد يورك مؤتمرات لبيان التصرفات الفراكتلية عند الحدود. بعض الصور كانت تبين تصرفات البندولات ذات **الحركة القسرية** forced motion، والتى يمكن أن تنتهى إلى إحدى حالتى ثبات. هذا النموذج يمثل، كما يعرف مستمعوه جيدا، الحركات الاهتزازية بصفة عامة، والتى تشاهد فى أكثر من صورة فى الحياة الواقعية. لإنتاج هذه الصور، قام حاسوبه بمسح شبكة من ألف نقطة فى ألف نقطة، كل نقطة تمثل موضعا ابتدائيا للبندول، ويحسب لكل نقطة نتيجتها، وتخرج النتيجة على لونين، أبيض وأسود، يمثلان حوضى التجاذب، مختلطين ومطويين بمعادلات نيوتن المعتادة، وكانت نسبة نقاط الحدود أكثر مما يتوقع؛ ففى المعتاد، كان أكثر من ثلاثة أرباع النقاط الموقعة تقع على الحدود.

بالنسبة للمهندسين والباحثين، كانت هذه الصور تمثل درسا، وتحذيرا. ففى كثير من الأحوال، يكون من الواجب تخمين المنطقة الفعالة للنظم المعقدة عن طريق عدد محدود من البيانات. فحينما يتصرف نظام بصورة عادية، مستقرا فى نطاق ضيق من العوامل، يقوم المهندسون بعمل ملاحظاتهم، محاولين توسيع نطاق هذا الاستقرار بطريقة خطية، آملين أن تنجح محاولتهم. ولكن العلماء الذين يدرسون مسألة حدود الأحواض الفراكتلية قد بيّنوا أن الفرق بين التصرف المستقر والكارثة قد يكون أعقد مما يمكن لأحد أن يتصوره. يقول يورك: "إن الشبكة الكهربية فى مجموعها نظام مهتز، ولكنه مستقر فى أغلب الأوقات. ويريد المهندسون أن يعرفوا تصرفها عند الاضطراب، والحدود بين استقرار الشبكة وانهيارها. والواقع يبين أنهم ليس لديهم أدنى فكرة عما تكون هذه الحدود عليه."

وتخاطب حدود **الأحواض الفراكتلية** مواضيع عميقة فى الفيزياء النظرية. **فالتحول الطورى** مسألة متعلقة بالحدود، وقد نظر بايتجن وريختر فى أفضل مسألة للتحول الطورى تمت دراستها، مغنطة المواد. أظهرت صورهم أشكال الحدود بين المغنطة واللامغنطة، بتعقيداتها المثيرة وألوانها الزاهية. وحين بدءا فى زيادة العوامل ودرجة الدقة، أخذت الصور تتجه أكثر وأكثر إلى العشوائية، وعلى حين غرة، إذا بالشكل المفلطح المألوف، بنتوءاته وتشعباته، يخرج من الأعماق، إنها فئة ماندلبروت. ولقد كتبا آنذاك: "ربما يجدر بنا أن نؤمن بالسحر."

■ ■ ■

شق ميشيل **برانسلى** لنفسه طريقا آخر. فقد فكّر فى صور الطبيعة، خاصة النماذج التى تنتجها الكائنات الحية. وقد اختبر فئات جوليا، وجرّب غيرها من العمليات، باحثا

عن طرق تنتج المزيد من التغيرات. وأخيرا، اتجه إلى العشوائية كأساس لتكنيك جديد لنمذجة أشكال الطبيعة. وحين كان يكتب عن هذا التكنيك، كان يسميه "التركيب الشامل للفركتلات، عن طريق النظم ذات المعادلات المتكررة *The global construction of fractals, by means of iterated function systems* على أنه حين كان يتحدث عنه، كان يطلق عليه "**لعبة الهيولية** The chaos game".

ولإجراء اللعبة الهيولية بسرعة، يجب أن يكون لديك حاسوب بشاشة ملونة ومولد أرقام عشوائية. على أن الفكرة يمكن إجراؤها من حيث المبدأ بواسطة قلم وورقة وقطعة عملة. اختر نقطة على الورقة، كيفما اتفق، ثم الق بالعملة. ضع قانونين، واحد لحالة ظهور الكتابة، والآخر لحالة ظهور الصورة. لنقل: إذا ظهرت الكتابة، انتقل بوصتين إلى الشرق، وإذا ظهرت الصورة، اتجه إلى نقطة المركز، بربع المسافة بين النقطة وبينها. لدهشتك، سوف ترى أن النقاط المرسومة مع التقدم فى اللعبة لا تنشئ حقلا مليئا بالنقاط العشوائية، بل شكلا يزداد وضوحا مع تقدم اللعبة.

كانت رؤية برانسلى على النحو التالي: فئات جوليا وغيرها من الأشكال الهيولية، والتى ينظر إليها كنتاج للعمليات التحديدية، وهى نظرة صائبة، لها أيضا وجه آخر فى الوجود؛ كوضع نهائى للعمليات العشوائية.

وقد استخدمت اللعبة الهيولية أحد الخواص الفراكتلية لبعض الصور، خاصية أنها نتاج نسخ أصغر من الصورة الأصلية. إن عملية كتابة قوانين يتكرر تطبيقها عشوائياً تحمل فى طياتها المعلومات العامة لإنتاج شكل ما، وتكرار تطبيق القوانين يفرز هذه المعلومات، دون النظر إلى مقياس ما. وكلما كان الشكل أكثر قربا من الفراكتالية، بهذا المعنى، كانت القوانين المناسبة أبسط.

وسرعان ما وجد برانسلى نفسه قادرا على إنتاج كافة الصور التى يتضمنها كتاب ماندلبروت-الذى أصبح يعد كلاسيكيا-من أشكال فراكتلية، فتكنيك ماندلبروت كان عددا لانهائيا من التكرار والتدقيق. فلإنشاء منحنى كوخ لكسفة الثلج، يمحو المرء جزءا من الخط ويستبدل به شكلا ما. أما عن طريق اللعبة الهيولية لبرانسلي، فإن الصور تبدو مهزوزة الملامح، ثم تتضح ملامحها بالتدريج. ليس هناك من داعٍ لعمليات التدقيق، فقط مجموعة من القواعد التى تتضمن بطريقة ما الشكل النهائى.

وانكبّ برانسلى ومساعدوه على برنامج لإنتاج الصور المختلفة، من النباتات أو من التراب أو من الطين. كان السؤال الجوهرى هو كيفية استنباط القواعد اللازمة للوصول

إلى شكل معين. كانت الإجابة، والتى أطلق عليها "**نظرية الملصقات** collage theorem" من البساطة بحيث يشعر المرء أن فى الأمر خدعة. لتبدأ برسم الشكل الذى تريد أن تعيد إنتاجه، وقد اختار برانسلى إحدى أوراق الشجر لتجربته. بعد ذلك استخدم الفارة لوضع نسخ مصغرة على الشكل حتى تغطيه، تاركا إياها تتراكب فوق بعضها البعض إذا لزم الأمر. وحين يكون الشكل فراكتاليا بدرجة كبيرة، فإن عملية التغطية تتم بصورة أسهل، ولكن على درجة معينة من التقريب، فإنه يمكن تغطية جميع الأشكال.

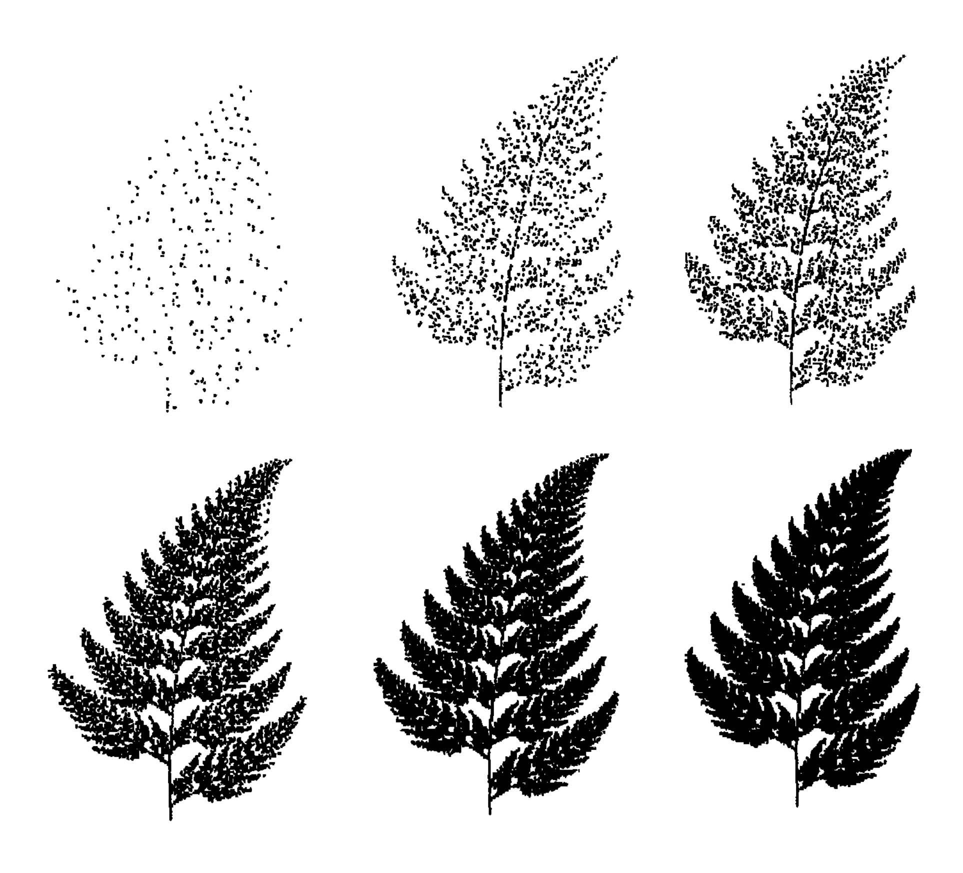
يقول برانسلى: "إذا كان الشكل معقدا، فإن قوانينه سوف تكون معقدة. أما إذا كان الشكل يتضمن خاصية فراكتلية بداخله–وقد لاحظ ماندلبروت أن أغلب أشكال الطبيعة تحوى هذه الخاصية المختبئة–فإنه يمكن بقوانين بسيطة تكويدها. مثل هذا النموذج أكثر إثارة من نموذج إقليدس، لأننا جميعا نعلم أن حرف ورقة الشجر ليست خطا مستقيما."

ويجادل برانسلى فى أن الطبيعة تلعب بالفعل صورة من اللعبة الهيولية خاصة بها. "لن يكون مستغربًا أن تكون هناك معلومات من هذا القبيل تحكم نموّ أوراق الشجر، بل المستغرب ألا يكون الأمر كذلك."

ولكن، هل الصدفة مطلوبة؟ لقد فكر هبارد أيضا فى وجود تواز بين فئة ماندلبروت وتكويد المعلومات البيولوجية، ولكنه كان يقف موقفا عدائيا ضد أية فكرة توحى باعتماد ذلك على الصدفة. "ليس فى فئة ماندلبروت أى مكان للصدفة، ولست أرى أية إمكانية لوجودها فى عالم البيولوجيا. إن كل شيء مهيكل بكل دقة، وإنى لأتخيل اليوم الذى يأتى فيه أحد وقد اكتشف تكويد كيفية بناء المخ بكل ما هو عليه من تعقيد ودقة."

على أنه فى تكنيك برانسلى تدخل الصدفة كأداة فقط. فالنتائج محددة وقابلة للتنبؤ بها. أما ومضات النقاط على شاشة الحاسوب، فليس لأحد أن يخمّن متى تكون الومضة التالية، إذ يعتمد ذلك على ما يفعله مولد الأرقام العشوائية بالجهاز. ولكن الومضات تقوم، بطريقة ما، بتخليق الصورة النهائية. يقول برانسلي: "إن للصدفة دورها المبدئى، ولكن الكائن الفراكتلى ذاته لا يعتمد على الصدفة بأية حال من الأحوال. فأنت حين تستكشف كائنا فراكتليا بخوارزم عشوائي، تكون كمن دخل غرفة مظلمة، فأخذت عيناه تحومان فى عشوائية فى الظلام. بعد فترة يأخذ فكرة عن الأشياء فى الغرفة، ولكن الأشياء ذاتها موجودة حقيقة لا علاقة لها بما يفعله الشخص الداخل."

كذلك فإن فئة ماندلبروت موجودة. كانت موجودة قبل أن يحوّلها بايتجن وريختر إلى فن، وقبل أن يفهم هبارد ودودى أساسها الرياضى، بل قبل أن يكتشفها ماندلبروت نفسه. لقد وجدت بمجرد أن وضع العلم أدواتها، الأعداد المركبّة والمعادلات التكرارية، ثم قبعت منتظرة أن يكشف عنها النقاب. أو ربما هى موجودة قبل ذلك، منذ أن بدأت الطبيعة فى تنظيم نفسها طبقا لقوانين فيزيائية بسيطة، تكررها فى صبر ما لا يحصى من المرات، بنفس الطريقة فى كل مكان وكل آن.



شكل ٨-٤ اللعبة الهيولية: تتساقط النقاط تسقط عشوائياً، ولكن شكل ورقة الشجر تظهر تدريجياً، وكل المعلومات الضرورية تجدها مكوّدة فى قواعد بسيطة.

i الخوارزم هو الخطوات المنطقية لحل مسألة حاسوبية، تمهيدا لوضع برنامج حاسوبى لها–المترجم

ii يرجع إلى اللوحة الملونة لفهم الموضوع بالتفصيل. المترجم

iii المحارف character (جمع محرف) هو كل ما على لوحة المفاتيح من رموز يمكن تكويدها حاسوبيا، وهى بالإضافة للحروف الأبجدية المعتادة letters والأرقام تشمل الرموز الخاصة كعلامات التعجب والاستفهام والرموز الحسابية والأقواس .... الخ.–المترجم

iv عملية التطبيق هى عملية تحويل رياضية. المترجم

v يقول بايتجن فى كتاب له أن معرضه عن هذه الأشكال قد جذبت مائة وأربعين ألف مشاهد فى خلال سنيتن – المترجم



جماعة النظم الديناميكية

كانت **سانتا كروز** Santa Cruz هى أحدث كلية تتبع جامعة كاليفورنيا، يقول الناس إنها أشبه بحديقة عامة عنها بكلية، فمبانيها غائصة بين الأشجار، وقد راعى المنفذون قدر استطاعتهم ترك الأشجار فى أماكنها. وقد افتتحت الكلية عام ١٩٦٦، وسرعان ما أصبحت تضم الصفوة من رجالات الجامعة. وكان قسم الفيزياء يضم خمسة عشر من الفيزيائيين الشبان الممتلئين حماسا، منفعلين بالحرية الفكرية التى كانت هى الموجة السائدة آنذاك، معتقدين بأهمية الجدية وترسيخ المبادئ.

كان أحد طلاب الدراسات العليا الذين لا شك فى جديتهم هو **روبرت شو** Robert Show. من بوسطون وخريج لهارفارد، يبلغ حين التحق بالكلية عام ١٩٧٧ اثنين وثلاثين عاما. وقد كان تخرجه أكبر بقليل من أقرانه، حيث اعترض مسار دراسته خدمة التجنيد وأمور أخرى. لم يكن يعلم لماذا أتى إلى سانتا كروز، إذ لم يكن قد رآها من قبل، اللهم إلا فى كتيب يشير إلى تنفيذ فلسفة جديدة فى التعليم. كان شو هادئ الطباع خجولا بقدر كبير، طالب مجد على بعد خطوات من الحصول على درجة الدكتوراه فى التوصيل الفائق. لم يكن أحد يعنيه أنه يهبط إلى الطابق السفلى كثيرا، ليلهو بالحاسوب هناك.

كان الأساتذة يستخدمون طلبة الدراسات العليا للمساعدة فى الأبحاث وفى إجراء الحسابات، وفى المقابل يحصلون على جزء من مبلغ المنحة الدراسية وعائد نشر الأبحاث. وحين تكون العلاقة طيبة بين الأستاذ ومساعده، فإنه يساعده على اختيار مواضيع مثمرة وطيعة، وقد يساعده أيضا على الحصول على وظيفة، وكثيرا ما كان اسماهما يظلاّن مرتبطين طوال العمر. وفى عام ١٩٧٧ لم تكن الهيولية موضوعا من موضوعات الدراسة، لم تكن قد انشئت بعد مراكز لدراسات النظم غير الخطية وأبحاث النظم المعقدة، ولا مراجع أو حتى مجلاّت علمية فى هذا العلم، حيث لم يكن لهذا العلم وجود بعد.

■ ■ ■

التقى **ويليام بروك** William Burke أستاذ الفلك والنسبية فى سانتا كروز بصديقه إدوارد شبيجل Edward Spiegel أستاذ الفيزياء الفلكية بجامعة كولومبيا فى الواحدة صباحاً فى قاعة استقبال فندق بوستون هوتيل، حيث كان مؤتمر عن النسبية منعقدا، فبادره شبيجل بالقول: "مرحبا، لقد سمعت لتوى عن جاذب لورنز."، وسحب صديقه للبار لتناول مشروب وشرح ما يقصد.

كان شبيجل يعرف لورنز شخصياً، ويسمع عن الهيولية منذ الستينات، وذو شغف باصطياد أصدقائه لإخبارهم بآخر الأنباء العلمية. وفى تلك اللية كان بروك هو صيده.

وكان بروك بدوره منفتحا لمثل هذه الأمور، وقد بنى لنفسه شهرة من خلال البحث فى أحد الأمور العويصة التى نبعت عن النسبية، **موجات الجاذبية** gravity waves. كانت مشكلة عالية اللاخطية، تثير تصرفات شاذة على غرار مشاكل اللاخطية المشاغبة فى ديناميكا الموائع. كما كانت مشكلة نظرية عالية التجريد، ولكن بروك كان مغرَماً بالمسائل المرتبطة بالواقع، يحب أن يقول عن نفسه إنه ينتمى إلى جيل منقرض، يعتبر الفيزياء موضوعا واقعيا. والأكثر من ذلك، فهو قد قرأ مقال ماى فى "الطبيعة"، والذى يناشد فيه العلماء ببذل المزيد فى مجال أبحاث اللاخطية. كما أنه بدوره قد قضى بضعة ساعات يتلاعب بمعادلات ماى مستخدما آلته الحاسبة. ومن ثم فقد بدا موضوع جاذب لورنز جذّاباً، واشتد شوقه لأن يراه. وبمجرد عودته إلى سانتا كروز، أعطى شو معادلات لورنز الثلاث، سائلا إياه إن كان بإمكانه وضعها على الحاسوب.

كان الحاسوب فى سانتا كروز موجودا بسبيل الصدفة فقط، إذ كانت النية متجهة لإنشاء كلية للهندسة، ثم أُلغى القرار، ولكن الحاسوب كان قد تم توريده. كان من طراز عتيق، ذى لوحة مفاتيح تماثل السنترالات (البدالات) التليفونية اليدوية فى سالف الزمان، خليط من أسلاك التوصيل والمقابس والقابسات. وكانت برمجة الحاسوب تتم عن طريق عمل توصيلات على لوحة المفاتيح هذه لتشكيل دوائر إلكترونية يتم التحكم فيها عن طريق المقابض الدوارة. وكانت الدوائر الإلكترونية هواية لدى شو.

وعن طريق التلاعب بمكونات الدوائر وقيمها، كان باستطاعة المبرمج تمثيل المعادلات التفاضلية بأسلوب يوافق متطلبات المسائل الهندسية. فتمثيل الاهتزاز فى السيارة يتم بدائرة تحتوى على ملف كهربى يمثل كتلة السيارة، ومكثف كهربى يمثل الزنبركات، بينما تمثل المقاومة الكهربية الاحتكاك. وعن طريق المقابض الدوارة يمكن تغيير معاملات الدائرة، فتجعل الزنبرك أقوى شداً أو الاحتكاك أقل قيمة. وعلى شاشة الحاسوب يكون بإمكانك أن ترى النتيجة على الفور، تأثير التغيير على طبيعة الاهتزاز.

فى الطابق العلوى، حيث معمل الفيزياء، كان على شو أن يقضى الساعات لإنهاء رسالته فى التوصيل الفائق. ولكنه كان يقضى بعضاً من الوقت مع الحاسوب العتيق، وقد رأى فضاء الطور لبعض من المعادلات لنظم بسيطة، كتمثيل لمسارات دورية. لو كان قد صادف الهيولية، متمثلة فى جاذب عجيب، لما كان بإمكانه التعرف عليها بكل تأكيد.

لم تكن المعادلات الثلاث المكتوبة على قصاصة من الورق تمثل مشكلة لشو فى برمجتها على الحاسوب، فما هى إلا بضع ساعات وكانت الدوائر قد شكلت، والمقابض قد وضعت فى أوضاعها الصحيحة. وبعد عدة دقائق من تشغيل الحاسوب، أيقن شو أن رسالة الدكتوراة فى مجال التوصيل الفائق لن يُقدَّر لها أن تتم!

قضى شو عدة ليال فى الطابق الأرضي، يشاهد النقطة الخضراء تحوم على شاشة الحاسوب، تدور وتدور راسمة قناع البومة لجاذب لورنز. كان تدفق الشكل يظل عالقا على شبكية عينيه، شيء وامض مرتعش، ليس كأى شيء صادفه فى أبحاثه. كان يبدو لعينيه حياة قائمة بذاتها تأسر اللب. نماذج تتوالى دون أن تكرر نفسها أبدا، كما يفعل اللهب تماما. سرعان ما اكتشف مفهوم الحساسية للظروف الأولية التى أقنعت لورنز بعدم جدوى التنبؤ بالطقس على المدى البعيد؛ فقد كان يغير من أحد العوامل، ويضغط ضاغط تشغيل الحاسوب، فينطلق الجاذب، ثم يكرر التجربة، متحريا أن تكون بنفس الظروف، بقدر ما تتيحه دقة القوابض المتحكمة، ولكن هيهات، إن الشكل الناتج لا علاقة له بالسابق بالمرة، ولكنه ينتهى على الدوام إلى نفس الجاذب.

كان لدى شو منذ نعومة أظفاره تصوُّر عن العلم؛ انطلاق جسور فى عالم اللامجهول، وكان ما يفعله الآن متفقا بالضبط مع هذا التصور. وأخيرا انتقل الحاسوب إلى غرفة شو بالدور العلوي، ولم تعد الغرفة مستخدمة فى مجال التوصيل الفائق بعد ذلك.

■ ■ ■

قال **رالف إبراهام** Ralph Abraham أستاذ الرياضيات لمستمعيه حين جاء فى الأيام الأولى ليشاهد جاذب لورنز حيا على شاشة الحاسوب: " كل ما عليك أن تفعله هو أن تضع يديك على هذه القوابض، وفجأة تجد نفسك مستكشفا عالما لم يرتده أحد من قبلك، لا تريد العودة منه." كان إبراهام مع ستيف سميل فى أيام المجد الخوالى فى بركلي، ومن ثم فقد كان من القلائل فى سانتا كروز ممن لديهم خلفية تمكنهم من فهم

ما يجرى على الشاشة. كان انطباعه الأوّلى هو الدهشة لسرعة العرض، وقد قال له شو إنه يستخدم مكّثفات لكبح جماح العرض عن الانطلاق بسرعة أكبر. كان الجاذب راسخاً، فعدم دقة الحاسوب لم تتسبب فى اختفائه وتحوله إلى شيء عشوائي. كل ما فى الأمر أنها كانت تجعله يلتوى أو يلف بصورة منطقية تماما. واستأنف أبراهام الحديث: "إن شو يعايش تجربة تنكشف أمامه فيها كل الأسرار، كل المفاهيم الأساسية؛ الأبعاد الكسرية ورقم **ليابونوف** Lyapunov exponent، كلها تأتى إليك بصورة طبيعية، تتأملها ثم تنطلق فى الاستكشاف."

أهو علم يا ترى؟ إنه بالتأكيد لا ينتمى للرياضيات، فهذا الحاسوب لا يقوم بعمليات تنظير أو برهنة. ومهما كان التشجيع من أناس مثل أبراهام، فذلك لن يغير من الأمر شيئا. ومن حيث كونه فرعا من الفيزياء، لم يكن لدى قسم الفيزياء سبب وجيه لاعتباره فى مجالهم أيضا. على أنه مهما كان الأمر بالنسبة له، فقد جذب إليه النظارة. كان من عادة شو ترك باب غرفته مفتوحا، وتصادف أن كانت تنفتح على الممشى إلى قسم الفيزياء. وسرعان ما وجد شو صحبة له.

اتخذت المجموعة التى أطلقت على نفسها **"جماعة النظم الديناميكية** *The dynamical system collective*"، أطلق عليها الزملاء "عُصبة الهيولية" غرفة شو مستقرا لها. كان شو يواجه صعوبة فى تسويق أفكاره أكاديميا، ولكن أصحابه لم تكن لديهم لحسن الحظ هذه المشكلة. كانوا مقتنعين بوجهة نظره فيما يتعلق ببرنامج غير مخطط لاستكشاف هذا العلم المجهول.

أصبح **دوين فارمر** Doyne Farmer، شاب فارع الطول من تكساس، المتحدث بلسان الجماعة. كان فى عام ١٩٧٧ فى الرابعة والعشرين، ممتلئا بالنشاط والحيوية، ومنبعا للأفكار. وكان **نورمان باكار** Norman Packard، أصغر منه بأربع سنوات، وصديق طفولة تربى معه فى نفس المدينة، قد وصل إلى سانتا كروز فى ذلك الخريف، وكان فارمر فى بداية عام مكرّس لدراسة نظرية الألعاب، مطبقة على لعبة الروليت. كان يدرس ميل المنضدة، واتجاه الكرات، ويكتب المعادلات ويضع البرامج الحاسوبية، وقد كان لهذه الدراسة أثر فى إعطائه قدرة على سرعة التحليل فى موضوع النظم الديناميكية.

أما العضو الرابع فى الجماعة فكان **جيمس كرتشفيلد** James Cruchfield، أصغرهم سنا، والوحيد من سكان كاليفورنيا، ماهر بدرجة غير عادية فى الحاسوب. جاء إلى سانتا كروز كطالب مستجد، ثم عمل مساعدا لشو فى برنامج التوصيل

الفائق، وقضى عاماً فى مركز أبحاث آى بى إم، ولم ينضم كطالب دراسات عليا فى سانتا كروز إلا عام ١٩٨٠، كان وقت تأسيس الجماعة يتردد على شو للحصول على ما يلزمه من معلومات رياضية عن النظم الديناميكية. وكأفرادها الآخرين، خرج عن الخط التقليدى فى الدراسة.

لم يقتنع قسم الفيزياء بجدّية ترك شو لبحثه فى التوصيل الفائق إلا فى ربيع ١٩٧٨، إذ كان قاب قوسين أو أدنى من الدكتوراه. فمن وجهة نظر القسم، مهما كانت درجة ضجره، فالأحرى به أن ينتهى من شكليات إنهاء الرسالة، ويحصل عليها، ثم ينطلق إلى حيث يشاء. أما عن دراسة الهيولية، فالأمر متعلق بالوضع الأكاديمي، فليس فى سانتا كروز من هو مؤهَّل للإشراف على رسالة فى ذلك العلم الذى لا اسم له ولا هوية، إذ لم يحصل أحد على درجة الدكتوراه فيه بعد. وبالتأكيد، ليس لطالب يرغب فى ذلك التخصص المجهول أن يأمل فى عمل يلتحق به فى الحياة العملية. ثم إن هناك مشكلة التمويل. فتمويل الأبحاث العلمية كان يتم من خلال المؤسسة العلمية الوطنية National Science Foundation، مُدعَّمة من هيئات قومية مثل سلاح الطيران والبحرية ووكالة الطاقة وغيرها. كانت منحة الدراسة فى بحث ما توكل للأستاذ الباحث، ينفق منها على كافة مصروفات البحث، من شراء للمُعدَّات أو المواد، وأيضاً فى دفع رواتب المساعدين فى البحث ممن يختارهم لذلك. فعلى طالب الدراسات العليا أن يجد أستاذاً يوظفه فى بحث له، وإلا فليس له مورد للرزق. هذا هو النظام الذى كان أعضاء الجماعة الأربعة على وشك عزل أنفسهم عنه.

حين كانت قطعة من المهمات الإلكترونية تُفقَد، فإنه أصبح من المألوف البحث عنها فى غرفة شو. وأحيانا كان أحد أعضاء الجماعة ينجح فى تدبير مائة دولار من منظمة الخريجين، أو من قسم الفيزياء. وبالتدريج أخذت المهمات مثل راسمة إلكترونية أو محول للجهد تتكدس فى غرفة شو. وكان فى قسم الفيزياء حاسوب قد استُغنى عنه وعلى وشك أن يلقى إلى مصيره الأخير فى مخزن المهملات، فوجد طريقه إلى غرفته. وأصبح فارمر على مهارة خاصة فى اختلاس أوقات من الحواسب الأخرى لحساب الجماعة. فذات مرة دُعى إلى مؤسسة أبحاث الطقس فى كولورادو، حيث أقوى الحواسب، وذهل المتخصصون هناك لقدرته على استغلال أوقات ثمينة منها.

وكانت للمهارة فى الإلكترونيات أثرها البالغ، فشو قد نشأ مولعا بها، وباركر كان متخصصا فى إصلاح أجهزة التلفاز، وكرتشفيلد كان على دراية خاصة

بمعالجات الحاسوب. وفى الوقت الذى كانت فيه حجرات قسم الفيزياء فى سانتا كروز لا تختلف عن مثيلاتها فى أية كلية أخرى، حوائط وأسقف تحتاج فى الغالب إلى إعادة الدهان، كان معمل شو يتخذ شكلا متميزاً. أكوام من الأوراق مختلطة بالمهمات الإلكترونية المكدسة، وعلى الحوائط تغطى خرائط الجاذبات تدريجيا أماكن الصور المعتادة لحسناوات جزر هاواي. وحين كان أحد المتطفلين يتخذ طريقه لهذه الغرفة ليلاً أو نهارا، يجد أعضاء المجموعة إما منكبيّن على تركيب دائرة إلكترونية أو عمل توصيلات كهربية، أو فى مناقشة حادة حول الإدراك أو حول التطور، أو ببساطة جالسين فى صمت مطبق أمام شاشة الحاسوب، أنظارهم معلقة بما يدور عليها من أشكال.

■ ■ ■

يقول شو: "لقد جذبنا حقا نفس الشيء، فكرة وجود نّظم تحديدية، ولكن ليس تماما. كان يخلب لبّنا أن هذه النظم التحديدية التى درسناها يمكن أن تتمخض عن تصرفات عشوائية. وكنا نقترب من فهم السر فى ذلك.

لا يمكن لأحد أن يقدّر مدى ما فى هذا الاتجاه من تجديد، إلا إذا تصور سنوات ست أو سبع من غسيل المخ فى الدراسة الفيزيائية، تعلمنا فيها النظم الكلاسيكية التى تخضع تماما للظروف الأولية، والنظم الكمية التى يقتصر ما نعرفه عن تصرفاتها على يتاح لنا من معلومات. أما اللاخطية، فشيء تلتقى به فى مؤخرة المراجع، كفصل نهائى يتم تجاوزه فى العادة، أو على أحسن الفروض يتعلم الطالب كيف يقربها إلى أقرب نظام خطى، حتى تكون الإجابة على القدر الممكن من التقريب. كان الأمر تدريبا على الإحباط.

لم يكن لدينا فكرة واضحة عن الأثر الحقيقى الذى تفعله اللاخطية بالنظم، كانت فكرة أن معادلة يمكن أن تتقافز فى تصرفات عشوائية تبدو مثيرة تماما. إذا لم تكن العشوائية واضحة فى المعادلة، فمن أين أتت؟ كانت تبدو كشيء تحصل عليه مقابل لا شيء، أو شيء ينتج من لا شيء."

ويقول كرتشفيلد: "كان إدراكنا بأنه يوجد هنا عالم من الفيزياء لا يدخل فى نطاق أى نظام معروف. لماذا لم يكن هذا ضمن ما تعلمناه؟ كانت فرصة لنا أن نقتحم هذا العالم الساحر، وأن نتعلم منه شيئا ما."

لقد متّعوا أنفسهم وأقنطوا أساتذتهم، بأسئلة مستحدثة عن التحديدية، وعن طبيعة الذكاء، وعن اتجاه التطور. يقول باكار: "إن الرباط الذى كان يشدنا لبعضنا البعض هو الرؤية المستقبلية. لقد ثبت فى روعنا أنه لو أن أحدا منا أخذ نظاما كلاسيكيا قتل بحثا كموضوع للدراسة، فقد ينجز فيه خطوة ضئيلة من التقدم، لا يدخل فى إطار هذا النظام الهائل من التحليل.

لقد كان بالإمكان أن تُكتشف الهيولية منذ زمن، ولكن ذلك لم يتحقق، جزئيا لأن الكم الهائل من العمل في مجال ديناميكا الحركة المنتظمة لا يؤدى لذلك الاتجاه. ولكنك فقط لو أمعنت النظر لوجدتها. "

ويقول فارمر: "من نظرة فلسفية، فقد هزتنى كطريق فعال يمكّنك من إيجاد توافق بين الإرادة الحرة والتحديدية. إن النظام تحديدي، ولكن ليس بإمكانك القول بما سوف يحدث الخطوة التالية. وفى نفس الوقت، كنت أشعر على الدوام بأن المشكلة الهامة هناك فى العالم الواقعى لها علاقة بخلق التنظيمات، فى الحياة أو فى الذكاء. ولكن، كيف يمكنك دراسة ذلك؟ فما كان البيولوجيون يدرسونه كان تطبيقيا ومحدداً، أما الكيميائيون فلا يقومون به، والرياضيون لا يقتربون منه، وكان شيئاً لا يمت للفيزيائيين بصلة. لكنى كنت أشعر على الدوام بأن الظهور المفاجئ للتنظيم الذاتى أمر يدخل فى نطاق الفيزياء.

إن تحت أيدينا عملة ذات وجهين؛ هنا نظام يتمخض عن فوضى، وعلى الجانب الآخر فوضى يكمن النظام فى أعماقها."

■ ■ ■

كان على شو ورفاقه أن يضعوا حماسهم الفيّاض فى برنامج علمى محدد؛ أن يضعوا أسئلة قابلة للإجابة، وتستحق الإجابة. إنهم يبحثون عن طريقة تربط النظرية بالتطبيق، فهناك شعورهم بوجود فجوة لا بد من ملئها. وقبل أن يبدءوا خطوتهم الأولى، كان عليهم أن يعلموا ما هو معروف وما هو غير ذلك، وهذا فى حد ذاته تحدٍ ليس بالهين.

كانت العقبة الكؤود أمامهم البطء الشديد فى وسائل الاتصال فى المناخ العلمي، وعلى الأخص حينما يتناثر علم جديد بين ثنايا مجالات العلوم المختلفة. ومن بين العوامل التى ساعدت كعلاج لهذه المعضلة كان ما قام به **جوزيف فورد** Joseph Ford، أحد أنصار الهيولية من معهد جورجيا التكنولوجى. كان فورد يرى أنه فى دراسة

اللاخطية يكمن مستقبل الفيزياء بأسره، ونصب من نفسه منارا لكل من أراد أن يبحر فى هذا الاتجاه، من خلال المقالات العلمية. كانت خلفيته فى **الهيولية غير التشتتية** non-dissipative chaos، فى مجالى الفلك وفيزياء الجسيمات الأولية. كان على دراية طيبة بمجهودات العلماء السوفيت فى هذا المجال، كما جعل من أهدافه إقامة الصلة بين كافة من ينتهجون هذا النهج مستغلا علاقة بالكثيرين فى كل مكان فما من أحد ينشر بحثا عن الهيولية إلا ويضاف ملخصه إلى قائمة فورد. علم أصدقاؤنا فى سانتا كروز عن هذه القائمة، ومن خلالها كان فيض من الرسائل المتبادلة بينهم وبين أصحاب البحوث.

أدركوا أن هناك العديد من الأسئلة التى يمكن أن تُسأل حول الجاذبات الغريبة، ما هى أشكالها المميزة؟ ما هى هياكلها الطبولوجية؟ ما الذى يمكن للهندسة أن تكشفه عن الفيزياء المتعلقة بالنظم الديناميكية؟ كان المنهج الأول هو الاستكشاف اليدوى الذى بدأ به شو. كان القدر الأكبر من المنهج الرياضى يتعامل مباشرة مع الهيكل، ولكنه بدا لشو أكثر تفصيلا مما يجب. فكلما غاص فى كتابات هذا المنهج، أحس بأن الرياضيين، وقد حُجبوا بتقاليدهم عن الوسائل الجديدة فى الحسابات، قد دفنوا تحت الكثير من التعقيدات عن هياكل المسارات، لا نهايات هنا وانقطاعات هناك. فالرياضيون لا يعبئون بما هو غير قطعى التحديد، والذى هو من وجهة نظر الفيزيائيين يمثل ما يحكم به الواقع العملي. فشو لم ير على شاشة الحاسوب مسارات منفصلة، بل أغلفة تضم بداخلها العديد من المسارات. هذه الأغلفة هى ما يتغير بينما هو يدير مقبض التحكم برقة. لم يكن مستطيعا أن يعطى تفسيراً متقنا لما يحدث من التواءات وانطواءات بلغة الطوبولوجيا الرياضية، ولكنه بدأ يشعر أنه يفهمها حق الفهم.



شكل ٩ -١ الخلط الهيولى: بعض القطرات تمتزج سريعا، البعض الآخر، قطيرة بالقرب من المركز، لا تكاد تمتزج على الإطلاق. بينت تجارب عديدة على سوائل حقيقية أن عملية المزج، والذى يبدى عنادا معروفا فى الطبيعة والصناعة على السواء، لا تزال غير مفهومة تماما؛ وقد تكشف مدى التصاقها برياضيات الهيولية. كشفت الأنماط عن عمليات للمطّ والشدّ تعود بنا إلى حدوة سمول.

يميل الفيزيائى إلى إجراء القياسات. فما الذى فى هذه الصور المتحركة المراوغة يمكنه قياسه؟ حاول هو والآخرون أن يعزلوا الخصائص التى تجعل للجاذبات الغريبة هذا السحر. الحساسية المرهفة للظروف الأولية، وميل المسارات القريبة إلى التباعد عن بعضها البعض. هذه الخصيصة التى جعلت لورنز يؤمن بأن التنبؤ بعيد المدى للطقس أمر محال. ولكن أين هى المعايير لقياس هذه الخصيصة؟ هل يمكن قياس عدم القابلية للتنبؤ؟

كانت الإجابة عن هذا التساؤل كامنة فى مفهوم روسى هو "رقم ليابونوف Lyapunov exponent" يعطى وسيلة لبيان الخصائص الطبولوجية المتعلقة بمفهوم مثل عدم القابلية للتنبؤ. فهذه الأرقام تعطى فى أى نظام طريقة لقياس التأثيرات المتعارضة للمطّ والانكماش والطى فى فضاء الطور للجاذب. إنها تعطى صورة لكافة الخصائص المؤدّية إلى الاستقرار أو عدم الاستقرار. فالرقم أكبر من الصفر يعنى المط، حيث تتباعد النقاط القريبة، الأقل من الصفر يعنى الانكماش. **والجاذب ذى نقطة محددة**، يكون للجاذب رقم سالب، حيث يكون التجاذب إلى الداخل، تجاه نقطة **الاستقرار**. **والجاذب الذى ينتهى إلى حركة متذبذبة** يكون ذا رقم يساوى الصفر بالضبط، ورقم آخر سالب. أما **الجاذب الغريب**، فقد اكتشف أن له رقما موجبا واحداً على الأقل.

لم يكن طلبة سانتا كروز هم من اكتشفوا هذا، لكنهم طوروه إلى أقصى قدر ممكن من الوجهة العملية، وقد علموا كيف يقيسون أرقام ليابونوف وأن يربطوا بينها وبين الخصائص الأخرى الهامة. استخدموا الحاسوب لإنتاج صور متحركة تبين **النظم الديناميكية** فى انتظامها وفى هيوليتها. وبينت تحليلاتهم كيف يمكن لبعض النظم أن تنزع للهيولية فى اتجاه ما، بينما تظل فى اتجاه آخر فى محيط الانضباط. بيّنت إحدى الصور المتحركة ما يحدث لمجموعة من النقاط المتجاورة–تمثل الظروف الأولية– على جاذب غريب حين يتطور مع الزمن، فالنقاط بدأت تتباعد وتفقد تركيزها، ثم تتحول إلى نقطة، ففقاعة. فى بعض الجاذبات، تتشتت الفقاعة سريعاً، وهى جاذبات لها كفاءتها فى عمليات الخلط. ولبعض الجاذبات الأخرى، يكون التشتت فى اتجاه معين، فيبدو ذلك وكأن للنظام نزعة للانتظام وعدم الانتظام معاً، والنزعتان منعزلتان. فبينما تؤدى نزعة إلى عدم القابلية للتنبؤ، تؤدى الثانية إلى دقة كالساعة، وكلا النزعتين يمكن تحديدهما وقياسهما.

■ ■ ■

أهم ما يُميّز بصمة باحثى سانتا كروز على علم الهيولية أنها ربطت بينها وبين ما يُسمى **بنظرية المعلومات** information theory، وهى مزيج من الرياضيات والفلسفة،

وضعها عام ١٩٤٠ **كلود شانون** Claude Shannon فى معامل شركة بل. وقد أطلق شانون على بحثه "نظرية رياضية للاتصالات"، ولكنها كانت تتعلق بكمية معينة، تسمى "المعلومات"، ومن ثم فقد شاعت تسمية نظرية المعلومات. هذه النظرية هى إحدى نتاج عصر الإلكترونيات. فقنوات وخطوط الاتصالات تحمل شيئا ما، سرعان ما أخذت الحواسب تختزنه على دوائر إلكترونية أو أقراص ممغنطة. هذا الشيء فى حد ذاته لا هو بذى معنى أو يحمل معرفة، فوحداته ليست أفكارا أو معاني، أو حتى حروفاً وأرقاما، وهو يمكن أن يكون ذا معنى أو بلا معنى، ولكن المهندسين والرياضيين كانوا قادرين على قياسه، ونقله، واختبار دقة النقل. لقد كانت كلمة "المعلومات" ذات نفع على الدوام، ولكنهم كانوا يستخدمونها دون الترابط المعتاد بالحقائق أو بالحكمة أو بالفهم.

وقد أثّر تصميم الأجهزة فى بناء النظرية، فلأن المعلومات كان تسجل على هيئة ثنائية binary بواسطة مفاتيح كهربية، إما موصلة أو مفصولة، فإن وحدة المعلومة أصبحت هى "البتة bit". ومن الناحية التقنية الصرفة، كانت نظرية المعلومات تهتم بمقدار درجة التشويش الذى يتداخل عشوائيا مع البتات المرسلة. وقد أدت إلى أن يمكن حساب الطاقة المطلوبة لنقل أو تخزين المعلومات على تلك الصورة، فى قنوات الاتصالات أو على الأقراص المغنطة أو المدمجة، سواء أكانت لغة مكتوبة أو صورة أو صوتا، أو أية هيئة تكود عليها المعلومات. وأعطت النظرية إمكانية معرفة مدى كفاءة نظام ما لتصحيح الأخطاء، عن طريق إجراء اختبارات معينة.

ومن المفاهيم الهامة فى هذه النظرية مفهوم "**التزيُّد** redundancy"[i]. تحتوى على قدر كبير من الوحدات الزائدة عن المطلوب لنقل المعلومة، وهو ما يمكننا من حل الكلمات المتقاطعة أو فهم عبارة ضاعت بعض معالمها. هذا التزيد فى اللغة والمرتبط بالمعانى من الصعب قياسه، لتداخل عوامل كثيرة فيه، ولكنه فى بعض الصور يقبل ذلك. فوجود حرف t فى اللغة الإنجليزية يجعل الأكثر احتمالا أن يتلوه حرف h، ثم حرف o، وهكذا. وكلما زادت عدد الحروف كان الاحتمال للحرف التالى أكبر. هذه الاحتمالات قابلة للقياس، وبها تكون وسائل فك الشفرات. كما يستخدمها المهندسون اليوم فى تكديس البيانات وضغطها فى قنوات الإرسال أو التخزين على الأقراص. بالنسبة لشانون، فإن الطريقة الصحيحة للنظر لهذه النماذج هى على الوجه التالي: إن تدفق البيانات بالنسبة للغة المعتادة ليس عشوائيا صرفا، فكل بتة bit جديدة تكون مقيدة بقدر ما بما سبقها من بتات، وعلى ذلك فكل بتة جديدة تحمل قدرا من المعلومات يقل بقدر ما عن قيمة بتة سابقة. ويوجد فى هذا العرض شيء ما من التضارب، كلما مال تدفق البيانات للعشوائية، زادت **القيمة المعلوماتية** information value للبتة الجديدة[ii].

وبالإضافة إلى ملاءمة هذه النظرية للمتطلبات الهندسية، اتخذت نظرية المعلومات ثوبا فلسفيا متواضعا، ويمكن أن يغزى قدر مدهش من انجذاب أفراد من خارج مجال شانون لنظريته فى معنى يتلخص فى كلمة واحدة؛ **الإنتروبيا** *entropy*. ويعبر وارن ويفر Warren Weaver عن ذلك بقوله: "حينما يقابل المرء مفهوم الإنتروبيا فى نظرية الاتصالات، فإن له الحق أن يشعر بالإثارة؛ الحق فى أن يتوقع شيئا أساسيا وجوهريا".

وقد ظهر مفهوم **الإنتروبيا** من علم الديناميكا الحرارية، حيث ارتبط بالقانون الثانى لها، والذى ينتهى إلى نزعة كافة النظم المغلقة، بما فيها الكون نفسه، إلى الانزلاق تدريجيا تجاه المزيد من الفوضى. تخيل أنك قسمت صندوقاً إلى قسمين بحائل، ثم ملأت نصفاً منه بالماء، والآخر بالحبر. فلو أنك نزعت الحائل، فإن الحبر والماء سوف يختلطان عن طريق الحركة العشوائية لكليهما، ولكن من المستحيل أن يعود النظام من تلقاء نفسه إلى حالة الانضباط الأولى، الحبر فى جانب والماء فى جانب آخر، حتى لو انتظرنا إلى نهاية الدهر. ومن هذا المنطلق ينظر للقانون الثانى للديناميكا الحرارية على أنه يجعل للزمن اتجاها وحيدا. والإنتروبيا هى خاصية يبين القانون الثانى أنها تتزايد مع الزمن، فى صورة خلط أو فوضى أو عشوائية. هذا المعنى من السهل فى الحياة اليومية فهمه بالسليقة، عن أن يقاس كميا، إذ ما هو المعيار الذى يعتمد عليه لتقدير درجة خلط مادتين؟ قد يتصور المرء قياس الجزيئات فى عينة معينة، ولكن ماذا إذا كان النظام مكونا من نبضات متتالية، نعم، لا، نعم، لا، لا، نعم، نعم٣، وهكذا؟ نظام موضوع بحيث يتحدى أى خوارزم للعد. وفى نظرية المعلومات، تضع موضوعات المعانى والتمثيل المزيد من التعقيدات. فتسلسل من البتات مثل ٠٠ ١٠٠، ١٠، ١١ ٠٠ ١٠، ٠٠، ٠٠٠ [iv] .... قد يبدو مألوفا فقط لمن له دراية بكود مورس. فماذا عن النماذج الطبولوجية للجاذبات الغريبة؟

بالنسبة لشو، ***كانت الجاذبات الغريبة آلات توليد للمعلومات***. ففى تصوره الأول والأعظم، تقدم الهيولية وسيلة طبيعية لإعادة الأفكار التى استخلصتها نظرية المعلومات من الديناميكا الحرارية–بعد تجديد نشاطها–إلى علم الفيزياء. فالجاذبات الغريبة، بدمجها النظام واللانظام، قد أدخلت قياس الإنتروبيا فى منعطف جديد ملىء بالتحدي، فهى مازجات غاية فى الكفاءة، تخلق عدم القابلية للتنبؤ، وترفع الإنتروبيا. لقد رآها شو، إنها تخلق المعلومات حيث ليس منها شىء متاح.

كان نورمان باكار يقرأ فى مجلة *Scientific American* حين رأى إعلاناً عن مسابقة للأبحاث العلمية، تسمى مسابقة لويس جاكو Louis Jacot. مسابقة ذات جائزة قيّمة مهداة من رجل أعمال فرنسى كانت له نظرية خاصة عن الفلك، والمجّرات داخل المجرات، وهو يدعو إلى أية مقالات تخدم مجاله. كان اليوم الأخير للمسابقة هو رأس السنة لعام ١٩٧٨.

كانت الجماعة قد انتظمت فى لقاءات دورية فى أحد المنازل فى سانتا كروز، مكدّس بالأثاث الذى تم شراؤه من سوق الأشياء المستعملة، وأجهزة الحاسوب المخصّصة لدراسة نظرية المقامرة. وكان شو يحتفظ بآلة بيانو فيه، يمتع زملاءه بخليط من الموسيقى الكلاسيكية والحديثة. وقد وضعوا نظاما للعمل مبنيا على طرح الأفكار بحرية، ثم تنقيحها طبقا لدرجة واقعيتها، وبالتدريج تعلّموا كيف يتعاونون مع المجلات العلمية، وكانت أول مقالة لهم من وضع شو.

في ديسمبر من عام ١٩٧٧ سافر شو لحضور مؤتمر فى أكاديمية نيويورك مخصّص للهيولية، ولسماع الكلمات من أشخاص لم يكن يسمع عنهم إلا من خلال أعمالهم؛ دافيد رول وروبرت ماى وجيمس يورك. وامتلأت نفسه بالرهبة إزاء هؤلاء الأشخاص. كان خلال سماعه للكلمات تتجاذبه أحاسيس بأنه قد انكبَّ على أفكار قد قُتلت بحثا، ولكن من جهة أخرى بأنه أصبح على دراية بنقطة جديدة للاستمرار. كان قد أحضر معه مسودة لبحثه غير المكتمل عن نظرية المعلومات، فشل فى كتابته على الآلة الكاتبة لضيق الوقت.

كانت أهم فعاليات المؤتمر هى حفلة العشاء التى أقيمت على شرف إدوارد لورنز، والذى أتيح له أخيرا أن يحظى بالاعتراف الذى راوغه لسنوات. وحين دخل لورنز الصالة، متأبطا ذراع زوجته فى خجل، هبّ الجميع على أقدامهم لتحيته، ودهش شو لنظرة الفزع التى بدت فى عينى عالم الطبيعة الجوية الجليل الشأن.

وفى طريقه للعودة، أرسل بحثه إلى مسابقة جاكو، خليط من الرياضيات الغريبة والفلسفة المثيرة للجدل، والأشكال الكارتونية التى رسمها أخوه كريس. فاز البحث بالجائزة، والتى أتت فى وقت حرج فى علاقة المجموعة بالإدارة، فقد هجر فارمر الفيزياء الفلكية، وباكار الرياضيات الإحصائية، أما كرتشفيلد فلم يكن مستعدا بعد لأن يعد من الخريجين، وقد أحست الإدارة بأن الأمور تخرج من بين يديها.

■ ■ ■

انتشر مقال "**الجاذبـــات الغريبـــة. التصرف الهيولى وتدفق المعلومات** *Strange Attractors, Chaotic Behavior and Information Flow*" إعادة كتابته فى ذلك العام حتى وصل ألف نسخة، وهو أول عمل جاد يربط بين نظرية المعلومات والهيولية.

استخرج شو بعض فروض الميكانيكا الكلاسيكية القابعة فى الظل، إن الطاقة فى النظم الطبيعية تكون على صورتين، ففى العالم الملموس، يمكن قياسها وحسابها بطرق عديدة، أما فى العالم اللاملموس، عالم الذرات التى تهيم فى عشوائية، فلا تقاس إلا كمتوسط لكينونة خاصة، هى الحرارة. وقد لاحظ شو أن الطاقة على المستوى اللاملموس تفوق بمرات نظيرتها على المستوى الملموس، ولكنها ليس لها اعتبار عند هذا المستوى، فدرجة الحرارة فى نطاق المستوى الملموس ليس لها اعتبار، إلا إذ كان مطلوبا معرفة درجة حرارة الجسم لمعرفة أسلوب حركته. إن المستويين لا اتصال بينهما، وكانت وجهة نظر شو أن النظم الهيولية والقريبة من الهيولية هى التى تقفل الفجوة بينهما، فالهيولية هى خالقة المعلومات.

يمكن تصوّر تيار مائى يواجه عائقاً، فعند سرعة كافية نجده يكون دوامات بعد عبوره العائق. فإذا كانت السرعة عند حد معين، نجد الدوامات ثابتة فى مكانها، وبعد سرعة معينة، نجدها تتحرك. ويمكن للباحث أن يجد طرقا عديدة لاستخلاص البيانات من نظام كهذا، باستخدام مسابر لقياس السرعة وأشياء مشابهة. ولكن، ماذا لو أننا جربنا طريقة مبسطة؛ لنختر نقطة بعد العائق مباشرة، ونقيس سرعتها عند فترات محددة، ونرى إذا كانت الدوامة إلى اليمين أو إلى اليسار.

لو أن الدوامة ثابتة، فإن تدفق البيانات سوف يكون على الوجه التالي: يسار، يسار، يسار.. وهكذا إلى أن يشعر المراقب أن التدفق لا يعطى أية معلومات جديدة عن النظام.

ومن الممكن أن يكون تدفق البيانات على النحو التالي: يمين، يسار، يمين، يسار، يمين، يسار، وهكذا. ورغم أن هذا التدفق أكثر إثارة بقدر ما عن الأول، إلا أنه أيضا سرعان ما يفقد هذه الإثارة.

أما حين يتحول النظام إلى الهيولية، فإنه سوف يصبح فيّاضا بالمعلومات فى كل لحظة. فكل قياس جديد (كل بتة من المعلومات) يحمل مفاجأته معه.

ما هو مصدر هذه المعلومات؟ فيض الحرارة فى المستوى اللاملموس، بلايين الجزيئات فى رقصاتها الديناميكية الحرارية. وبالضبط كما ينقل الاضطراب الطاقة من

العالم الملموس خلال سلاسل من الدوامات لتتشتت خلال اللزوجة على مستويات أصغر فأصغر، فالمعلومات تنتقل فى مسار عكسى من المستويات الأدنى إلى الأعلى-على أية حال، فهكذا نظر شو ورفاقه للمسألة. والقناة التى ينتقل عبرها المعلومات صعودا لأعلى هى الجاذبات الغريبة، تكبر العشوائية الابتدائية بالضبط كما يُكبِّر تأثير الفراشة حالات عدم التأكد الضئيلة إلى نماذج للطقس على مقياس أكبر.

وكان السؤال، إلى أى مدى؟ مرة أخرى، وجد شو أن السوفيت كانوا فى المقدمة. فقد وضع كل من أ.ن. **كولموجوروف** A.N. Kolmogorov **وياشا سيناى** Yasha Sinai بارعة عن طريقة تطبيق "معدّل الإنتروبيا بالنسبة للزمن" على الصور الهندسية للأسطح التى تطوى وتمط لفضاء الطور. والفكرة الجوهرية هى وضع مربع صغير حول مجموعة من الظروف الأولية، كما لو قمنا بوضع مربع صغير على سطح بالون، ثم يحسب تأثير ما يجرى على المربع من التواءات وتمدد. فهو قد يتمدد فى اتجاه واحد، بينما يظل ضيقا فى اتجاه آخر، ويقابل التغير فى المساحة دخول عنصر اللاتأكد فى ماضى النظام، أى اكتساب أو فقد للمعلومات.

وبالقدر الذى تعتبر فيه المعلومات مجرد كلمة براقة لعدم التأكد، فإن هذا المفهوم لا يزيد عن أن يتفق مع الأفكار التى كان علماء مثل رول يقومون بوضعها. ولكن إطار نظرية المعلومات مكن مجموعة سانتا كروز من اتباع منهج منطقى رياضى تم فحصه تماماً عن طريق منظرى الاتصالات. فإضافة شيء من التشويش على نظام تحديدى أصلا مسألة غريبة على الديناميكا ولكنها مألوفة تماما لعلماء الاتصالات. وكان ما يشد هؤلاء العلماء الشبان حقيقة هى الرياضيات بصورة جزئية. فهم حين خاضوا فى النظم المنتجة للمعلومات، كانوا يفكرون فى التوليد التلقائى للنماذج فى العالم. يقول باركار: "فى قمة العمليات الديناميكية المعقدة يوجد التطور البيولوجى وعمليات التفكير، ويبدو بداهة إحساس واضح بأن هذه النظم التى هى غاية فى التعقيد منتجة للمعلومات. فمنذ ملايين من السنين مضت، لم يكن على وجه الأرض سوى تجمّعات من كائنات وحيدة الخلية، والآن، بعد كل هذه الدهور، ها نحن هنا، ومن ثم فإن المعلومات قد خلقت وخزنت فى أبنيتنا. وفى تطور عقل المرء منذ الطفولة، فإن المعلومات لا تختزن فقط، بل أيضا تنتج، تنتج من ارتباطات لم تكن موجودة من قبل." كان نوعا من الحديث يبث الدوار فى رأس أعتى الحكماء من الفلاسفة.

■ ■ ■

لقد كانوا علماء أولاً، ثم فلاسفة ثانياً. هل بإمكانهم أن يصلوا الفجوة بين الجاذبات الغريبة التى يفهمونها جيدا وبين تجارب الفيزياء الكلاسيكية؟ إن القول بأن تدفقاً من يمين، يسار، يمين، يمين، يسار، يسار، يسار... هو غير قابل للتوقع ومنتج للمعلومات شيء، وقياس رقم ليابونوف وإنتروبيا وأبعاد تدفق حقيقى شيء آخر. ورغم ذلك فإن فيزيائيى سانتا كروز قد أمتعوا أنفسهم بهذه الأفكار أكثر من غيرهم من أقرانهم القدامى. فبمعايشتهم الجاذبات الغريبة ليل نهار، أصبحوا يتعرفون عليها فى ظواهر الرفرفة، والاهتزاز، والتأرجح، والنبض التى تحدث فى الحياة اليومية.

كان من عادتهم القيام بلعبة معينة، أن يجلسوا فى أحد المقاهي، ثم يسألوا بعضهم البعض: "ما أقرب جاذب غريب عنا؟ أهو حاجز التصادم المهتز لهذه السيارة، أم ذلك العلم المرفرف، أم هذه الأوراق التى يداعبها النسيم؟" وقد كان شو، وهو يعد عدته لبرنامج بحثى يستغرق سنوات، قد ابتدع أبسط نظام ديناميكى يمكن لفيزيائى أن يتصوره، مجرد **صنبور** يتساقط منه الماء. وقد يظن أغلب الناس أنه نظام دوري، ولكن واقع التجربة يبين غير ذلك. "إنه نموذج لنظام يمكن أن يتحول من القابلية للتوقع إلى عدم القابلية لها، فبزيادة الفتحة قليلا، تسمع طرقات الماء وقد اختل انتظامها. لقد اتضح أنه نظام لا توقعى بعد برهة صغيرة من الزمن، ومن ثم فإن نظاما من البساطة كهذا يمكن أن ينتج نموذجا خلاّقا."

ولا يصلح **صنبور** المياه فى إنتاج العديد من النظم، فهو لا يقدم إلا قطرات متشابهة، ولكن بالنسبة لباحث مبتدئ فى مجال الهيولية، فقد أثبت الصنبور أنه يتمتع بعدة مزايا. سهل التصور ذهنيا، وتدفق البيانات فيه وحيد البعد كأفضل ما يكون، نقرات رتيبة لنقاط منفردة سهلة القياس مع الزمن. لم يحز أى من النظم التى درست لاحقا فى سانتا كروزمثل نظام الوقاية البشرى أو التصادمات فى معجلات الجسيمات فائقة الطاقة على مثل هذه المزايا. وقد حصل مجربون آخرون مثل **لبشابر** Libchaber وسوينى على بيانات وحيدة البعد عن طريق وضع مسابر فى مواضع اعتباطية عند نقطة فى نظم أكثر تعقيدا، أما فى الصنبور المائى فكل ما فى الأمر هو البيانات التى تسير فى خط واحد، وهى لا تحتوى حتى على سرعات أو درجات حرارة متغيرة، مجرد قائمة لنقاط متساقطة مع الزمن.

وتجهيزا لحملة استكشافية لنظام كهذا، يقوم الفيزيائى الكلاسيكى بوضع نموذج واف بقدر استطاعته. والعمليات التى تحدد إنتاج والتحكم فى القطرات مفهومة، وإن لم تكن بالبساطة التى تبدو عليها. فأحد المتغيرات الهامة هو معدل التدفق، والذى كان

من الواجب أن يكون بطيئا بالنسبة للنظم الديناميكية الأخرى، فقد استخدم شو معدلا يصل من نقطة إلى نقطة إلى عشر نقاط فى الثانية، أى ٣٠ إلى ٣٠٠ جالون كل أسبوعين. ومن المتغيرات الأخرى **اللزوجة** والتوتر **السطحى**. إن قطرة معلقة تنتظر وقت انفصالها، تمثل شكلا معقدا ثلاثى الأبعاد، تتطلب حساباته وحدها تحليلا حاسوبيا معقدا، كما بين شو. وبالإضافة لذلك، فالشكل ليس ثابتا، فهو أشبه بحقيبة مرنة قوامها التوتر السطحي، تمتلئ وتستطيل بالتدريج إلى أن تعبر نقطة حرجة تنفصل بعدها. وإذا ما أراد فيزيائى أن يضع نموذجا وافيا لهذه القطرة، بكتابة كافة العوامل الداخلة فى تشكيلها على صورة معادلات يمكن حلها لكافة المواقف، سوف يجد نفسه فى متاهة يصعب الخروج منها.

والبديل الآخر هو نسيان الفيزياء كلية، والنظر فقط للبيانات، كما لو كانت آتية من صندوق مصمت. لو أن متخصصا فى النظم الديناميكية الهيولية قد أوتى قائمة بالقطرات عند فترات منتظمة من الزمن، هل سيجد بها شيئا هاما يمكنه أن يقوله؟ لقد اتضح فى الواقع أنه يمكن وضع تنظيمات معينة للبيانات يمكن العودة بواسطتها إلى الفيزياء، وأن هذه الطرق أصبحت فى غاية الأهمية بالنسبة لصلاحية تطبيق الهيولية فى العالم الواقعى.

ولكن شو مضى فى طريق وسط بين هذين الاتجاهين المتطرفين. فهو قد وضع نموذجا تقريبيا للقطرة، تجاهل فيه الشكل، والحركة المعقدة ثلاثية الأبعاد، متصورا ثقلا معلقا من زنبرك، وأن الثقل يزيد وزنه بانتظام مع الزمن. سوف يزداد مط الزنبرك تدريجيا، ويهبط الثقل أكثر وأكثر، إلى أن يسقط جزء منه عند لحظة ما. وافترض شو اعتباطيا أن الكتلة التى سوف تنفصل تعتمد بصورة مباشرة على السرعة لحظة الانفصال.

والذى يحدث بداهة بعد ذلك أن الثقل يرتد لأعلى، ويتذبذب الزنبرك فى حركة يمكن لأى طالب لم يتخرج بعد أن يضع المعادلات لنمذجتها. ولكن الخاصية المثيرة فى النموذج، والصورة الوحيدة من اللاخطية والتى تجعل الحركة الهيولية محتملة، هو أن القطرة التالية تعتمد على كيفية تفاعل الزنبرك مع الثقل المتزايد فى الوزن. فالارتداد لأسفل يمكن أن يزيد من سرعة الانفصال، بينما يمكن أن يبطئ الارتداد لأعلى منه. وفى حالة صنبور حقيقي، فإن القطرات ليست جميعها متساوية فى الوزن، فالوزن يعتمد على كل من اللزوجة واتجاه الارتداد. فإذا بدأت قطرة حياتها وهى هابطة، فإن ذلك يعجل من سرعة انفصالها، أما إذا بدأت وهى متزنة، فسوف يكون بإمكانها أن تنتظر شيئا ما فتزداد امتلاء. وقد كان نموذج شو من البساطة بحيث يمكن نمذجته فى ثلاثة معادلات

تفاضلية، الحد الأدنى للنظم الهيولية كما بين بوانكريه ولورنز. ولكن هل يمكنه أن يولد تعقيدا يماثل ما ينتجه صنبور حقيقي؟ وهل سيكون نفس نوع التعقيد؟

وهكذا وجد شو نفسه قابعا فى معمل فى مبنى الفيزياء، فوق رأسه صندوق كبير من البلاستك ممتلئ بالماء، يتصل الماء فيه بصنبور نحاسي على أرقى ما أنتج من صنابير. وتقطع كل قطرة ساقطة شعاعاً ضوئياً بحيث تُسجَّل فى حاسوب فى غرفة مجاورة. فى نفس الوقت يوجد حاسوب آخر مغذى بالمعادلات الثلاث، يجمع البيانات لنظام تخيلي. وذات يوم قدم شو عرضاً مثيراً، القطرات المتساقطة تصدر صوتاً على قطعة من القصدير، والحاسوب يواكب الصوت قطرة بقطرة على شاشته. لقد حلّ المسألة من الأمام ومن الخلف فى آن واحد، وأمكن لمشاهديه أن يسمعوا البنية الداخلية لهذا النظام العشوائى ظاهريا. ولكن للتقدم عن ذلك، تحتاج المجموعة إلى طريقة تأخذ بها البيانات الخام من تجربة ما، وتسير منها إلى وضع المعادلات والجاذبات الغريبة الخاصة بالتصرف الهيولى.

فى نظم أكثر تعقيدا، قد يتخيل المرء رسما متغيراً فى مقابل الآخر، بربط التغيّر فى الحرارة أو فى السرعة مقابل الزمن. ولكن صنبور شو لم يكن يعطى إلا سلسلة من بيانات متعلقة بالزمن، ولذا فقد جرب شو تكنيكا أصبح فيما بعد أهم مساهمات مجموعة سانتا كروز فى دراسات الهيولية، يمكن به رسم فضاء الطور لجاذب غريب ليس متاحا رؤيته، ، قابل للتطبيق على أية بيانات مهما كانت. فبالنسبة للصنبور، رسم شو شكلا بيانيا ثنائى الأبعاد، على محوره الأفقى الفترة بين القطرة الأولى والثانية، وعلى المحور الرأسى الفترة بين الثانية والثالثة. فإذا مرت ١٥٠ ميلى ثانية فى الفترة الأولى، ومثلها فى الفترة الثانية، كان توقيع النقطة هو ١٥٠-١٥٠.

كان هذا كل ما فى الأمر. فإذا كان التيار منتظما فى تدفقه، فإن الشكل لن يزيد عن نقطة. وكان الفرق فى الواقع بين النظام الواقعى والممثل حاسوبياً هو تعرض الأول للتشويش، وهو ما دعا شو إلى أن يجعل أغلب عمله مساء، حين تخف الضوضاء إلى أقصى حدٍ، والتى يكون تأثيرها أن تتحول النقطة الموقعة على الشكل البيانى إلى بقعة غير محددة الملامح.

وبزيادة سرعة التدفق، يبدأ النظام فى الدخول فى مرحلة التفرع الثنائي، حيث يمكن أن تكون فترة ١٥٠ ملى ثانية والتالية , ٨٠ على ذلك يظهر الشكل البيانية بقعتين بدلا من واحدة، واحدة عند النقطة ١٥٠-٨٠ والأخرى عند ٨٠-, ١٥٠ وكان الاختبار

الحقيقى حين يتحول النظام إلى الهيولية. فلو أنه كان عشوائيا صرفا، لملأت النقاط سطح الورقة، بحيث يستحيل إدراك أية علاقات نحو توزيعها. ولكن لو أن جاذبا غريبا كان متضمنا فيه، فإنه سوف يظهر نفسه بتحويل البقع غير المحددة الملامح إلى هياكل واضحة.

فى الغالب كان إظهار الهيكل يحتاج إلى ثلاثة أبعاد، ولكن لم تكن هذه مشكلة. فهذا الأسلوب يمكن تطويره بسهولة لأبعاد أعلى. ويعكس هذا الأسلوب ثقة هؤلاء الباحثين العمياء فى وجود نظام كامن فى أعماق النظم التى تبدو عشوائية، وأنه يظهر نفسه حتى فى حالة عدم معرفة العوامل الفيزيقية الفعالة، أو عدم إمكان قياسها. وبدأت مجموعة سانتا كروز تتعاون مع باحثين آخرين مثل سينواي، وتعلموا كيف يظهرون الجاذب الغريب لشتى النظم. كانت المسألة تتلخص فى توقيع فضاء الطور بالأبعاد المناسبة. وسرعان ما وضع **فلوريس تاكنز** Floris Takens الذى اكتشف الجاذبات الغريبة مع دافيد رول، الأساس الرياضى لهذا الأسلوب القوي، والذى يستخلص الجاذبات الغريبة من تدفق البيانات الواقعية. وقد اتضح لعدد لا يحصى من الباحثين بعد ذلك، أن هذا الأسلوب يميز بين الهيولية وبين التشويش. فالأخير يبعثر البيانات بلا ضابط، بينما تقوم الهيولية بجذبها إلى شكل متميز.

■ ■ ■

كان التحول من متمردين إلى فيزيائيين يمضى ببطء، فكثيرا ما كانوا يتساءل أحدهم خلال جلساتهم فى المعمل أو فى المقهى: "ربّاه، إننا لا نزال على هذا الطريق، فإلى متى؟"

كان مناصروهم الأساسيون هم رالف إبراهام من قسم الرياضيات، ومن قسم الفيزياء فقد كان فى حالة حرجة. فبعد عدة سنوات، انبرى فريق من الأساتذة لنفى أن المجموعة قد عانت من الإنكار والمعارضة من القسم، بينما ظل أفراد المجموعة يحتفظون بالذكريات الأليمة لهذه حيث الحرمان من الإمكانيات ومن الموجهين.

على أن الفترة لم تخل من معاونة وتشجيع، فقد استمر أستاذ شو المشرف على بحث التوصيل الفائق فى دعمه مادياً بعد انسحابه من البحث لمدة عام تقريبا. ولم يقم أحد بإعطاء أمر صريح بوقف أبحاث الهيولية. فأسوأ ما وصلت إليه الأمور كان التجاهل، ومحاولة إثناء أفراد المجموعة فرداً بعد الآخر عن الاستمرار فى هذه الأبحاث، بإسداء النصح بأنه طريق غير مأمون علمياً، حيث لا توجد درجة للدكتوراه فيه.

إن هذه الأبحاث، قد يقول الناصح، مجرد نزوة سرعان ما ستخبو، فأين تذهب بعدها؟ على أن أبحاث الهيولية كانت تدعم خطواتها، وكان على أفراد المجموعة اللحاق بها.

بعد عام، جاء **فايجنباوم** ليعطى سلسلة من المحاضرات حول الفتح العلمى المتمثل فى **العمومية**. وكالعادة، كانت محاضراته رياضية صمًّاء، تدور حول نظرية **إعادة الاستنظام** التى لم يدرسها أفراد المجموعة. كما أن المجموعة كانت بالنُّظم الواقعية أكثر من خرائط وحيدة البعد، وفى هذه الأثناء سمع فارمر عن رياضىٍّ، هو **أوسكار لانفورد الثالث Oscar Lanford III** يقوم بأبحاث فى الهيولية، فمضى للقائه. واستمع إليه لانفورد بأدب، ثم قال إنه لا يوجد بينهما ما هو مشترك، فهو يحاول فهم فايجنباوم.

وتساءل فارمر، أين حصافة الرجل؟ إنه مُغرم بهذه المسارات، ونحن فى خِضَمّ نظرية المعلومات بكل ثرائها، نعزل الهيولية، ونسمع نبضها، ونحاول ربط الإنتروبيا ورقم لايبنوف بالوسائل الإحصائية.

فى حديثه مع فارمر، عرض لانفورد لمفهوم العمومية، ولم يدرك فارمر إلا مؤخراً أنه قد فاته ملاحظة هذا المعنى "يالها من سذاجة منِّى، إن العمومية أكثر من مُجرَّد نتيجة رائعة، فهى تضمن توظيف جيش متعطل من باحثى **الظواهر الحرجة** critical phenomena.

فحتى هذه اللحظة كانت النظم الديناميكية تدرس كل حالة على انفراد، إذ لم يكن فى إمكاننا أن نقوم بما يتم عمله فى النظم الخطية، حيث توضع مبادئ عامة قابلة للتطبيق على كافة الحالات. هذا ما حققته العمومية.

كما أن هناك عاملاً اجتماعياً له أثره، فميشيل قد صاغ نتائجه بلغة إعادة الاستنظام، والتى يتقنها دارسو الظواهر الحرجة. هؤلاء القوم كانوا يمرون بظروف صعبة، حيث لم يعد هناك من الظواهر ما تسحق الدراسة. كانوا يبحثون فى كل مكان عن مجال يمارسون فيه علمهم. ثم جاء فايجنباوم ليقدم حقيبة ملأى بالعجائب، أفرزت العديد من المجالات."

على أن دراسى سانتا كروز قد قاموا بوضع بصمتهم الخاصة بهم بأنفسهم. فقد ارتفع شأنهم داخل القسم بعد حضورهم المثير لاجتماع تمَّ فى منتصف شتاء ١٩٧٨، نظَّمه **برناردو هبرمان** Bernardo Heberman من معمل زيروكس للأبحاث فى بالو ألتو، والتابع لجامعة ستانفورد، عن **فيزياء المواد المتكاثفة** condensed matter physics. لم

يكن أفراد المجموعة مدعوّين، ولكنهم حضروا على أية حال، مكدّسين أنفسهم في سيارة شو الفورد من طراز ٥٩، المعروفة فى المنطقة باسم "الحلم الكريمى". وتحسّباً للظروف، أخذوا معهم شاشة وجهاز عرض فيديو. وعند اعتذار لأحد المحاضرين، دعا هبرمان شو لإلقاء كلمة. كان الوقت محدداً بدقة، وكانت الهيولية قد أضحت كلمة مثارة فى الأفق، ولكن لم يكن يفهم معناها من بين الحضور إلا نفر قليل. وبدأ شو يشرح الجاذبات فى فضاء الطور، أولا نقطة، حين يكون النظام فى حالته المستقرة، ثم فى شكل منغلق، حين يكون النظام متذبذبا فى دورة مستقرة، ثم جاذب غريب فى الحالات الأخرى. وساعدته أجهزة العرض على سحر أعين الناس، على حد قوله. قدّم لهم جاذب لورنز، وصنبوره ذا المياه المتساقطة، شارحا الجانب الهندسي، كيف تبدو الأشكال حين تُمط أو تُطوى، وكيف يُترجم ذلك فى نطاق نظرية المعلومات المحترمة. كانت كلمة رائعة بكل المعايير، وأمكن للحضور أن يروا الهيولية لأول مرة تُعرض بأعين زملائهم من سانتا كروز.

■ ■ ■

فى عام ١٩٧٩ حضر أفراد المجموعة المؤتمر الثانى عن الهيولية، فى أكاديمية نيويورك للعلوم، هذه المرة كمدعوين، وكان الموضوع قد أخذ احترامه اللائق. كان اجتماع ١٩٧٧ خاصاً بلورنز، ولم يحضره إلا بضعة عشرات، أما هذا الاجتماع فكان خاصا بفايجنباوم، وحضورُه بالمئات. وبينما لم يكن باستطاعة شو فى الاجتماع الأول تدبير آلة كاتبة لنسخ بحث يدسّه تحت أبواب القوم، كان لمجموعة النظم الديناميكية الآن مطبعة تلاحق بالكاد أبحاثهم.

ولكن الجماعة لم تكن لتستمر للأبد، فكلما كان الاقتراب من الحياة العلمية الحقة، كان الإيذان باقتراب تفككها. ذات يوم طلب هبرمان شو، ولكنه وجد كرتشفيلد. كان هبرمان بحاجة لمعاون فى بحث عن الهيولية، وكان كرتشفيلد، أصغر الجماعة سنّاً، مشغول البال حول مستقبله. ومن جهة كان هبرمان يتمتع بكل المزايا التى يفتقدها دارس الفيزيقاء، ومن جهة أخرى كان بحاجة لحاسوب، وقد تمكن كرتشفيلد من إنجاز العمل له فى ساعات. أرادت الجماعة أن تتدخل فى العمل بصفتها، ولكن هبرمان رفض، لقد كان يريد معاوناً لا أكثر.

وحين ظهر البحث فى إحدى المجلات العلمية المحترمة، كان إنجازاً ضخما لكرتشفيلد، ولكنه بداية الغيث لانحلال الجماعة لينخرط أفرادها فى

العالم الرحب. فقد استشاط فارمر غيظا، متهما كرتشفيلد بالانشقاق وتثبيط روح الجماعة.

ولم يكن كرتشفيلد هو الوحيد فى العمل خارج الجماعة، ففارمر ذاته، وباكار، كانا على اتصال بالشخصيات المؤثرة من الفيزيائيين والرياضيين، مثل سوينى ويورك. إن الأفكار التى نبعت فى بوتقة سانتا كروز قد أضحت جزءا راسخا من إطار الدراسات الحديثة للنظم الديناميكية. فحين كان فيزيائى يجمع مجموعة من البيانات، ويريد أن يقدّر ما لها من أبعاد أو إنتروبيا، فإن التعاريف والأساليب الملائمة تكون هى ما ابتدعته الجماعة فى فترة حياتها الأولى. كان علماء الطبيعة الجوية يتجادلون عما إذا كانت هيولية الطقس ذات أبعاد لا نهائية، كما يذهب الفكر التقليدى للنظم الديناميكية، أم تخضع لجاذب غريب ذى عدد محدود من الأبعاد. ومحللو الاقتصاد يحاولون البحث عن جاذب عجيب فى تحليل بيانات **البورصة**، بأبعاد تساوى ٣.٧ أو ٥.٣، فكلما قلَّت الأبعاد زاد النظام بساطة. العديد من الخصوصيات فى الرياضيات تتطلب التصنيف والفهم؛ البعد الكسرى، **بعد هاوسدورف** Hausdorff، رقم ليابونوف، **البعد المعلوماتى** information dimention، هذه الدقائق من خصائص النظم الهيولية قد شُرحت بشكل أفضل عن طريق شو ويرك. ويعد الجاذب هو أول مستوى من المعرفة مطلوب لتوصيف خصائصه. فهو الخصيصة التى تعطى كمية المعلومات الضرورية لتوصيف موضع نقطة على الجاذب فى إطار درجة دقة معينة. وقد ربطت الطرق التى تولدت فى سانتا كروز هذه الأفكار بالخصائص الأخرى المهمة للنظم، مُعدّل انخفاض القابلية للتنبؤ، معدل تدفق البيانات، الميل لخلق التمازج. أحينا كان العلماء حين يستخدمون هذه الطرق يجدون أنفسهم يوقعون البيانات، يرسمون مربّعاتٍ صغيرة، ويحصون عدد النقاط فى كل مربع. على أن هذه الطرق التى تبدو بدائية قدً قربتٍ من فهم الهيولية لأول مرة.

فى نفس الوقت، فإنه بتعلم النظر للجاذبات الغريبة فى الأعلام الخفاقة وفى الاهتزازات الميكانيكية، فإن العلماء قد حققوا نجاحاً فى تشخيص الهيولية التحديدية فى كافة ثنايا الفيزياء. الشوشرة غير المتوقعة، والاهتزازات الغريبة، والخلط بين المنتظم وغير المنتظم، ظهرت كل هذه التأثيرات فى بحوث لمجربين يعملون فى كل مجال، من المسرعات إلى الليزر إلى وصلة جوزيفسون. كان علماء الهيولية يجعلون التشخيص شيئا خاصا بهم، فيمكن أن يبدأ بحث بالعبارة التالية: "لقد تلاحظ فى مذبذب وصلة جوزيفسون وجود شوشرة ترتفع فجأة، ليست معللة بالتذبذبات الحرارية."

وفى الوقت الذى غادرت فيه الجماعة، رأى البعض أن سانتا كروز قد فقدت الفرصة لأن تكون مركزا قوميا رائدا فى مجال دراسات الديناميكا غير الخطية، يسبق المراكز التى أنشئت فى هذا المجال. وفى بداية الثمانينات، كان كل فرد من المجموعة قد شق طريقه الخاص بعد تخرجه. شو عام ١٩٨٠، فارمر ١٩٨١، باكار ١٩٨٢، وكرتشفيلد ١٩٨٣، من بينهم، كان شو هو الذى لم يتابع المجال، فظل إسهامه مقصوراً على بحثين، ذلك الذى أكسبه رحلة باريس، ثم الذى ضم أبحاث الجماعة عن الصنبور، والذى يلخص عملها. بل إنه قد هجر المجال العلمى كلية، فهو كما قال عنه أحد أصدقائه، كان لا يستقر على حال.

---

i اختلفت الاجتهادات فى القواميس التخصصية لوضع مقابل لهذا المصطلح بين: إضافة، حشو، زيادة، إطناب، والمقابل الوارد فى المتن من اجتهاد المترجم، على أساس إبراز أن هذه الإضافة خالية من أى معنى، ولكن قيمتها فى نظرية المعلومات أنها تساعد على اختبار عملية النقل، مما يمكن من وضع النظم ذاتية الاختبار، أو ذاتية التصحيح، بالنسبة للأخطاء فى نقل المعلومات. المترجم.

ii تقوم نظرية المعلومات على مبدأ بسيط وبديهى، إن قيمة المعلومة تكمن فى درجة عدم احتمال الخبر الذى تنقله، فقولك بأن الشمس سوف تسطع غدا يحمل قيمة فى الشتاء أكبر منها فى الصيف (يعبر عن ذلك رجال الإعلام بأن القول بأن كلبا عض رجلا لا يصلح خبرا صحفيا، بعكس القول بأن رجلا عض كلبا). فإذا كانت ظاهرة دورية تماما، فإنه بعد الدورة الأولى يكون أية معلومة عنها تساوى الصفر فى قيمتها، أما إذا كان الحدث غير متوقع بالمرة، فإن المعلومة عنه تكون كبيرة جداً. ولمن به شغف بالرياضيات نقول إن الصيغة الرياضية التى وضعها شانون لقيمة المعلومة يجعلها تتناسب مع اللوغاريتم الطبيعى للاحتمال، فإذا كان الاحتمال مؤكداً، أى =١ كانت قيمة المعلومة صفرا، وإذا كانت المعلومة غير متوقعة بالمرة، كان الاحتمال لها صفرا، وقيمة المعلومة قيمة قصوى. المترجم.

iii يتم نقل البيانات بالطريقة الثنائية عن طريق نبضات كهربائية، ويقصد بـ"نعم" أن النبضة موجودة، و"لا" النبضة غير موجودة. المترجم.

iv الواحد يعبّر عن وجود النبضة، والصفر عن أنها غير موجودة- المترجم.



الإيقاعات الداخلية

نظر **برناردو هبرمان** Bernardo Huberman إلى الجمع من مستمعيه من البيولوچيين والفيزيائيين والرياضيين والأطبّاء، وأيقن على الفور أنه سوف يواجه مشكلة فى عملية الاتصالات. كان قد فرغ لتوه من إلقاء حديثٍ غير عادى فى اجتماع غير عادى، المؤتمر الأول للهيولية فى مجال البيولوچيا والطب، عُقد تحت رعاية مشتركة من أكاديمية نيويورك للعلوم، والمعهد القومى للصحة النفسية، ومكتب الأبحاث البحرى. وقد شاهد هبرمان فى قاعة المؤتمر وجوها لأشخاص مرموقين فى المجال، ووجوها غير مألوفة أيضاً. كان المؤتمر يقترب من نهايته، فقد كان اليوم الأخير منه.

كان هبرمان، الذى ظل مواصلاً طريقه فى أبحاث الهيولية منذ تعاونه مع جماعة سانتا كروز، باحثاً فى مركز زيوركس للأبحاث فى بالو ألتو. ولكنه كان أحيانا ينغمس فى أبحاث تخرج عن نطاق المركز. وفى هذا المؤتمر كان قد ألقى كلمة عن نموذج يشرح حركة العينين لمريض **الشيزوفرانيا**.

لقد تجادل علماء النفس طويلاً حول تعريف الشيزوفرانيا والمصابين بها، ولكن المرض ظل عصيّاً على التعريف، كما هو على العلاج. فأهم أعراضه تبدو على العقل وعلى التصرف. فحين يحاول المريض أن يتابع حركة بندول، فإنه يفقد القدرة على المتابعة، بينما العين فى الشخص السليم قادرة على المتابعة لفترة طويلة، كثيراً دون إدراك من الشخص نفسه، فالصور المتحركة تظل مجمّدة على الشبكية لفترة ما. أما عين المريض بالشيزوفرانيا فلا تفتأ تقفز قفزاتٍ سريعة، تسرع أو تبطئ عن الصورة المتحركة، ولا يعرف أحد السبب.

وقد جمع الأطباء قدراً كبيراً من البيانات على مرّ السنين، صنّفوها فى قوائم أو بيّنوها على أشكال توضّح أنماط هذه الحركة الغريبة من العينين. وقد افترضوا عامة أن ذلك بسبب اضطرابات شاذة فى الإشارة القادمة من الجهاز العصبى إلى العضلة المتحكمة فى حركة العين. كما افتُرض أيضاً وجود اضطرابات فى المخ تظهر فى العينين. ولكن الفيزيائى هبرمان كان له رأى آخر، وقدّم نموذجاً متواضعاً.

لقد فكّر فى أبسط صورة لحركة العين، وكتب معادلة لها، تتضمن معاملاً لسعة تذبذب البندول، ومعاملاً لتردده، ومعاملاً للقصور الذاتى للعين، ومعاملاً للاحتكاك بها، وكذا معاملا تصحيحيا للخطأ، لتجعل العين مثبّتة على الهدف.

وكما شرح هبرمان لمستمعيه، فإن المعادلة تصف حركة نموذج ميكانيكى مشابه، كرة تتدحرج على مستوى منحن على هيئة السّرج، بينما السرج ذاته يتأرجح ذات اليمين وذات الشمال. تمثل حركة الكرة من جانب لآخر الحركة الترددية للبندول، بينما تمثل حوائط السرج خاصية التصحيح، والتى تحاول جذب الكرة إلى القاع. وقد أجرى هبرمان حسابات معادلاته لساعات على الحاسوب، مغيّراً من المعاملات ومستخرجاً الأشكال البيانية، وقد وجد فى التصرفات الناتجة كلاً من الانتظام ومن الهيولية. فمع معاملات معينة تكون حركة العين منتظمة، ولكن عند معاملات أخرى تدخل الحركة فى تتابع سريع من تضاعف الفترات، مما ينتج عدم الانتظام الذى لا يختلف عما وُصف فى أبحاث العلماء.

وفى النموذج، ليس للحركة الشاذة أية علاقة بمؤثرات خارجية. إنها نتيجة حتمية لزيادة اللاخطية فى النظام ذاته. وبالنسبة لبعض الأطباء الحاضرين، كان نموذج هبرمان يوافق نموذجاً عاماً مقنعاً عن المصابين بالمرض. فعدم الخطية، والتى يمكن أن تؤدى لاستقرار النظام كما تؤدى لاضطرابه، بحسب قوتها أو ضعفها، قد تكون ذات صلة بظاهرة مرضية عامة. فقد أشار البعض الآخر أن ظاهرة اضطراب حركة العينين ليست مقصورة على الشيزوفرانيا، بل تتلاحظ فى حالات عصبية أخرى كثيرة. فكل صور التصرفات الديناميكية، التذبذات الدورية واللادورية، كلها متاحة لمن يريد تطبيق مفهوم الهيولية، حتى فى مجال الأمراض العضوية، حيث يتلاحظ أن الزيادة الشديدة فى حامض اليوريك تتسبب فى ظاهرة مرضية مشابهة خاصة بمرض النقرس.

رأى الحاضرون من العلماء آفاقا جديدة للأبحاث تفتح أمامهم. على أن فريقاً منهم رأى أن نموذج هبرمان مغرق فى التبسيط وعبروا عن ذلك حين جاء وقت طرح الأسئلة: "أريد أن أسأل عما يقود عملية النمذجة، لماذا البحث بالذات عن هذه العناصر للاخطية، أقصد التفرغ الثنائى والحلول المؤسسة على الهيولية؟".

يرد هبرمان بعد فترة صمت: "أوه، حسنا، يبدو أننى بالفعل قد فاتنى أن أوضح هذه النقطة. إننى كهيولى متخصص أعلم أن أبسط نموذج عام لنظام تتبعى يمكن كتابته يحتوى على هذه الخصائص، سواء أكان حالتنا هذه أم حالة هوائى يتتبع إشارة ما. إنها خصائص عامة لا تعتمد على تفاصيل المجال المطبّقة فيه".

وينبرى آخر ثائراً ضد التبسيط المغالى فيه للنموذج، ومبينا أن الحالة الواقعية هى أن العين يحكمها أربع عضلات، ويدخل فى تفاصيل علمية غاية فى التعقيد يرى أن النموذج الحق يجب أن يحتويها. ويأخذ منظم الجلسة الكلمة قائلاً: "أرى أن على أن أعقب على الأمر. إن ما رأيناه اليوم هو أحد متخصصى الديناميكية اللاخطية الذين يبحثون فى النظم العامة قليلة الأبعاد، حين يتحدث إلى بيولوچى مسلح بأدوات رياضية. إن الفكرة فى الواقع هى وجود شمولية بين النظم، تظهر فى أبسط النماذج.

إن الحالة فى الحقيقة هى أن العلماء والأطباء حين يرون خمسين ألف حالة مختلفة، يصعب عليهم الاعتقاد بشئ ما مشترك فيما بينها جميعا، ولكن ها قد أتى برنارد بنظامه المبسط، ليريكم ما بإمكانه أن يفعله."

يرد هبرمان: "لقد حدث هذا بين علماء الفيزيقاء منذ خمس سنوات، ولكنهم اليوم جميعا مقتنعون".

■ ■ ■

إن الأمر دائما سيان، أن تصنع نموذجاً يماثل الحقيقة حق التمثيل، أو تصنعه مبسّطاً سهل التداول، وإن السذج من العلماء هم فقط الذين يعتقدون أن النموذج المتكامل هو فقط الذى يمثل الحقيقة. إن نموذجا كهذا يمكن أن يكون له نفس عيوب خريطة مسهبة فى التفاصيل، فتضيع معها الملامح العامة. فالخرائط والنماذج، يجب أن تكون التفاصيل بهما على قدر الحاجة الفعلية.

وبالنسبة **لرالف أبراهام**، رياضى سانتا كروز، فإن مثالا لنموذج جيد للعالم الحى هو الذى يبنى على ما يسمى **"فرض الجايا"** الذى وضعه **جيمس لفلوك** James Lovelock مع **لين مارجلز** Lynn Margulis. فى هذا الفرض تخلق الشروط اللازمة لاستمرار الحياة بواسطة الحياة ذاتها، ويحافظ عليها بواسطة عمليات للحفظ التلقائى عن طريق تغذية خلفية ديناميكية. والنموذج من البساطة لدرجة أن يظن به البلاهة، الأرض مُغطّاة بنوعين منالنباتات، أبيض وأسود، ثم صحراء، ثلاثة ألوان فقط هى الأبيض والأسود والأحمر تغطى سطح الكرة الأرضية. إن هذا النموذج على بساطته يبين لنا كيف يتم التوازن البيئى على سطح الكرة الأرضية، وكيف تنظم درجة الحرارة بما يسمح باستمرار الحياة.

النباتات البيضاء تعكس الضوء، مما يجعل الكوكب أكثر برودة، والسوداء تمتصه، فتقلل من درجة انعكاس الضوء، فتجعل الكوكب أكثر دفئا. ولكن النباتات البيضاء

محتاجة لطقس أشد دفئا، والسوداء محتاجة لطقس أكثر برودة. هذه الخصائص يمكن تمثيلها بمجموعة معادلات تفاضلية، تدخل للحاسوب لتتفاعل فيما بينها. إن مدى واسعا من الظروف الأولية يمكن أن يؤدى إلى جانب يعبر عن التوازن، ليس بالضرورة أن يكون توازنا استاتيكيا.

يقول إبراهام: "إنه مجرد نموذج رياضى مبسط، فلست فى حاجة لنماذج عالية التطابق مع الواقع للنظم البيولوجية أو الاجتماعية. كل ما عليك هو أن تحدد نسبة ما لانعكاس الضوء، ثم بعض الظروف الأولية، وتراقب ملايين السنين من التطور تمر أمام عينيك، وأن تعلم النشء أن يكونوا على دراية بما يجرى على كوكب الأرض".

ويجد العلماء المغرمون بالأنظمة المعقدة مثلهم الأعلى متمثلاً فى جسم الإنسان. لا يوجد على وجه البسيطة مثل هذا النظام الذى يُقدِّم ثروة من الحركات على كافة المستويات، المرئية وغير المرئية، من عضلات وسوائل وتيارات كهربية وخلايا وألياف. ولا يوجد نظام فيزيائى قابل للتجزئة مثل هذا النظام، كل جهاز له تركيبه وله كيميائيته، وقد قضى الباحثون سنوات وسنوات لمجرد وضع أسماء لأجزائه. ولكن، كم تستعصى هذه الأجزاء على الاستيعاب! قد يكون أحد الأجزاء عضواً ملموساً مثل الكبد، أو شبكة متشبعة مثل الجهاز الدورى، أو ربما شيئاً تجريديا غير ملموس مثل الجهاز المناعى، وما به من أنظمة تكويد وفك التكويد لما يغزو الجسم من كائنات. إن دراسة نظم كهذه دون الإلمام التام بتشريحها وكيميائيتها أمر غير مجدٍ، ولذا يدرس أطباء القلب طرق النقل الأيونى خلال الأنسجة العضلية، وأطباء المخ طرق القدح النيورونى، وأطباء العيون اسم وموضع كل عضلة للعين.

وفى عام ١٩٨٠ أدخلت الهيولية نوعا جديداً من دراسة الفسيولوچيا (علم وظائف الأعضاء)، مبنيا على فكرة النماذج الرياضية المبسطة التى تعطى نظرات شاملة بصرف النظر عن التفاصيل. فينظر الباحث إلى الجسم كموضع للحركة والاهتزازات، ويضع الوسائل للاستماع إلى ما يصدر عنه من نبضات مختلفة. لقد اكتشفوا إيقاعات لم تكن متاحة عن طريق عينات الدم أو شرائح المجهر، ودرسوا الهيولية فى اضطرابات الجهاز التنفسى، واستكشفوا آليات التغذية الخلفية التى تتحكّم فى كرات الدم البيضاء والحمراء. ووضع باحثو السرطان أفكاراً حول الدورية واختلال النظام فى دورة نمو الخلايا. كما درس أطباء النفس أسلوباً متعدد الأبعاد لوصفات العقاقير المثبطة للاكتئاب.

ولكن الاكتشافات فى مجال عضو واحد فاق كل الاكتشافات، ألا وهو القلب، والذى تحدد إيقاعاته بكل دقة، مستقرة أو غير مستقرة، عادية أو مرضية، الفرق بين الحياة والموت.

■ ■ ■

كتب **دافيد رول** حين تصدى لوضع أفكار عن هيولية القلب يقول: "إنه النظام القلبى نظام ديناميكى ذو أهمية حيوية بالغة، وهو فى حالته العادية نظام دورى، ولكن أمراضاً عديدة تنبع من عدم دوريته تؤدى إلى حالة ثابته، ألا وهى الموت. ولعل قدراً كبيراً من الفوائد يمكن أن تستخلص من الدراسات الحاسوبية لنموذج رياضى واقعى يمكنه أن ينتج أنظمة ديناميكية قلبية مختلفة".

وتحمل عبء التحدى فرق من الباحثين فى كل من الولايات المتحدة وكندا. فالاضطرابات فى دقات القلب قد فحصت منذ أمد طويل، وصنفت تحت مسميات مختلفة، ويمكن تمييز الكثير منها بواسطة الأذن المدربة. كما يمكن للعين المدربة أن تقرأ الكثير عن طريق الرسومات البيانية لرسم القلب. ولكن علماء الهيولية قد اكتشفوا مدى عدم ملاءمة تلك التصانيف، حيث تمت بناء على ظواهر سطحية، متجاهلة أسباباً أكثر عمقا.

لقد اكتشفوا **ديناميكية القلب**. وكانت تخصصاتهم فى الغالب غير مألوفة. **فليون جلاس** Leon Glass من جامعة مكجل McGill فى منتريال بكندا كان متخصصا فى الفيزيقاء والكيمياء، حيث أبدى شغفا بالأرقام وباختلال النظم، وأتم رسالة الدكتوراة فى موضوع الحركة الذرية داخل السوائل قبل أن يتجه لأبحاث اضطرابات القلب. يقول جلاس: "إن الإخصائيين يشخصون الأمراض المتعلقة بالقلب بالنظر إلى قصاصة لرسم القلب، يميزون بها أنماطا من الاختلالات، تعلّموها فى مراجعهم. إنهم فى الواقع لا يملكن ملكة تحليل ديناميكية هذه الإيقاعات، بينما هى على درجة من الثراء أكثر مما يتصوره إنسان بالرجوع إلى المراجع."

وفى كلية الطب بجامعة هارفارد، يعتقد **آرى جولدبرجر** Ary Goldberger مساعد مدير مركز أبحاث اضطرابات القلب فى مستشفى بث إسرائيل أن أبحاث القلب قد أصبحت تمثل صلة بين الأطباء والرياضيين والفيزيائيين، حيث يقول: "إننا الآن فى المقدّمة، أمامنا طراز جديد من الظواهر. فحين نرى التفرع الثنائى، والتغيّرات الفجآئية فى التصرفات، لا نجد فى الفكر التقليدى شيئاً يفسر ذلك، فمن الواضح أننا بحاجة إلى نماذج جديدة للقيام بهذا التفسير. "كان على جولدبرجر ورفاقه أن يكسروا

الحواجز بين اللّغات العلمية والتصانيف الأكاديمية. كانت العقبة الأولى فى نظره هى عدم تقبّل أغلب الأطباء للرياضيات، ويقول فى ذلك: "فى عام ١٩٨٩، لم يكن لك أن تقابل كلمة "فراكتال" فى أى مرجع طبى، وأعتقد أنه بحلول ١٩٩٦ لن تقابل مرجعاً طبيا لا يحتوى على هذه الكلمة!"

إن الطبيب حين يستمع لدقات القلب، يسمع تصادم سائل من سائل، وسائل مع جسم صلب، وجسم صلب مع آخر، فالدم يسرى من غرفة لأخرى، تدفعه من الخلف عضلات تنقبض، ويجذبه إلى الأمام جدران تنبسط، ويصدّه عن الرجوع صمامات تتقفّل بكل قوة. وانقباضات العضلات فى حد ذاتها تعتمد على موجات كهربية معقدة ثلاثية الأبعاد. ونمذجة جزء من أجزاء القلب بكل أمانة يتجاوز قدرة أقوى حاسوب متصوّر، أما نمذجة النظام ككل فشئ خارج عن التصور. إن النمذجة الحاسوبية على غرار ما يفعله مهندسو الطيران فى شركة بوينج أمر خارج عن المألوف بالنسبة للأطباء".

إن التجربة والخطأ كانا هما الوسيلة لتصميم الصمامات الصناعية المصنوعة من قطع من المعدن والبلاستك، والتى تنقذ حياة من يستخدمها اليوم. على أن الأمر يحتاج لما يشبه صمام القلب الطبيعى، تركيبة رقيقة مرنة من ثلاثة كئوس. ولكى يسمح للدم بالدخول إلى غرفة الضخ فى القلب، يجب أن ينفتح الصمام فى رفق، ولكى يمنع الدم من الرجوع، يجب أن ينقفل الصمام بإحكام بفعل ضغط الدم، وأن يقوم بهذه المهمة دون أن يجهد أو يبلى عدة بلايين من المرات. ولكن المهندسين لم يتقنوا عملهم فى هذا المجال، فالصمامات القلبية كانت تصمّم على طراز أعمال السباكة، وكانت مشكلة الإجهاد والتسرب من الصعوبة بمكان. إن الدم حين يتدفق تعتريه بعض الدوامات، يمكن أن ينتج عنها جلطات غاية فى الخطورة على الإنسان. فقط فى عام١٩٨٠ أمكن الاستفادة من تقنية النمذجة الحاسوبية فى تصميم صمامات القلب. لقد أنتج الحاسوب صوراً متحركة، ثنائية الأبعاد فى الواقع، ولكنها معبرة تماما، تسرى بها مئات النقاط تمثل جزيئات الدم وهى تعبر الصمامات، وتضغط على جدران القلب المرنة، ولكنها معبرة تماما، تسرى بها مئات النقاط تمثل جزيئات الدم وهى تعبر الصمامات، وتضغط على جدران القلب المرنة، وتنتج الدوامات. وقد وجد الرياضيون أن القلب يضيف المزيد من التعقيد، بتأثيره على الجدران المرنة منه، فالأمر يختلف عن تصادم الهواء بجناح الطائرة الصلب مثلاً، ففى حالة القلب يتأثر السطح فى صورة ديناميكية لا خطيّة.

أما الأمر الأكثر خفاء وخطورة فهو حالات **لغط القلب** arrhythmias، ومن صورها **الارتجاف البطيني** ventricular fibrillation الذى يتسبب فى وفاة الآلاف فى الولايات المتحدة فقط، وهى تنتج عن شىء يعرفه الأطباء، انسداد فى الشرايين يؤدى إلى موت العضلات الضاخة. الكثير من هذه الحالات تنتج عن تعاطى المخدرات أو الأدوية الكيميائية أو الضغط العصبى أو غير ذلك من أسباب، ولكن فى حالات أخرى يظل السبب غامضا. فحين يواجه الطبيب حالة من الارتجاف البطينى، يود لو يرى سبباً ملموسا يعالجه، فالمريض السوى الذى يجتاز هذه الأزمة يكون عرضه لتكرارها.

فى حالة القلب السليم، تجرى عمليات انقباضات وانبساطات العضلات بنظام دقيق، طبقا لوصول موجات كهربية ثلاثية الأبعاد، تعمل متوافقة مع بعضها البعض تماما، ولكن فى حالة الارتجاف البطينى، يفقد هذا التوافق، فيختل النظام، ويفشل القلب فى عملية الضخ المنتظم.

ومن الأشياء المحيرة أنه فى حالة الارتجاف البطينى، يعمل كل جزء على انفراد بصورة طبيعية، مستجيبا لما يرد إليه من موجات. لهذا السبب يرى علماء الهيولية أن أسلوبا جديداً لفحص الموضوع يجب التفكير فيه، الأجزاء سليمة، ولكن المنظومة فى مجموعها مختلة. إنها صورة من اضطرابات النظم المعقدة، بالضبط كالاختلال العقلى، بصرف النظر عن وجود أسباب كيميائية من عدمه، فهى اضطراب فى نظام معقد.

لن يكف القلب عن اللغط من تلقاء نفسه، فهذه الصورة من الهيولية مستقرة، ويحتاج الأمر إلى صدمة يعرفها متخصصو النظم الديناميكية لكى يعود القلب لحالته الطبيعية. وقد كان تصميم هذه الصدمة من حيث قوتها وشكلها أمرا تجريبيا بحتا، إذ لم تكن توجد نظرية عن هذا الأمر. لقد اكتشف الآن أن بعض الفروض لم تكن صحيحة. وفى حالات اضطرابات أخرى استخدمت العقاقير، أيضاً بطريق التجربة والخطأ، فبدون فهم جيد لديناميكية القلب، من الصعب التنبؤ بتأثير أى عقار. إن قدرا كبيراً من المجهودات قد بذل لفهم التفاصيل بكل دقة، فقط الجانب الآخر من القضية لم يبذل فيه الجهد الكافى، فهم المنظومة ككل.

■ ■ ■

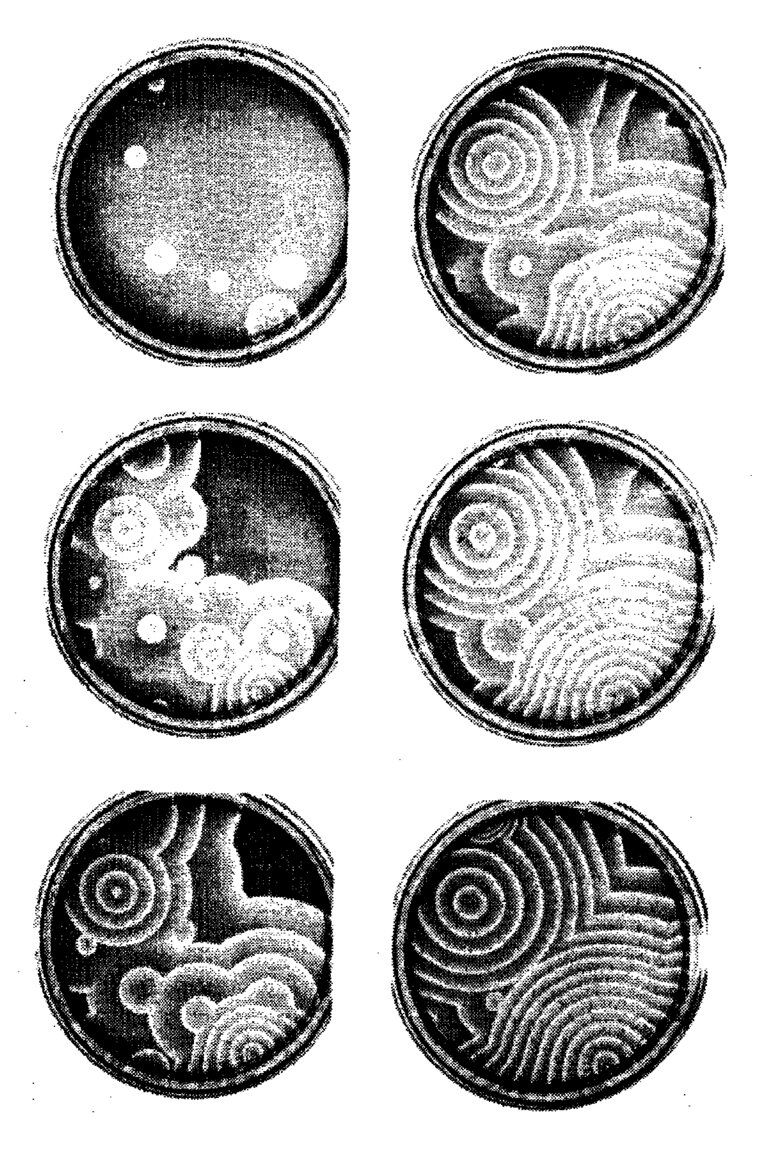
جاء **وينفرى** Winfree من عائلة لم يتخرج أحد منها من الجامعة، وقد كان والده كثير التجوال بالأسرة، مما أدى به إلى أن يلتحق بأكثر من مدرسة قبل أن ينهى دراسته

المتوسطة. كان يسيطر عليه حب البيولوجيا والرياضيات، ولما لم يجد بين الاثنين رابطة، قررّ أن يتخذ لنفسه طريقاً خاصاً. لقد درس الهندسة الفيزيائية لخمس سنوات فى جامعة كورنل، تعلّم خلالها الرياضيات التطبيقية وكماً كبيراً من الأساليب المعملية، بعد ذلك أتيح له أن يحصل على درجة الدكتوراة فى البيولوچيا من جامعة برنستون، وذلك عن طريق الدراسة عن بعد، بينما كان يقوم بالتدريس فى جامعة شيكاغو.

كان طرازاً فريدا بين البيولوچيين، يستخدم حاسته الخاصة تجاه الهندسة خلال عمله فى المواضيع النفسية. وقد بدأ فى السبعينات دراساته عن **الديناميكا البيولوچية**. بادئاً **بالساعة البيولوچية**، موضوع يبحث تقليديا فى مجال دراسة سلوك الحيوان. كان من وجهة نظره أن هذا الموضوع يجب أن يدرس من زاوية رياضية، يقول فى ذلك: "لقد درست باستفاضة النظم الديناميكية اللاخطية، وتأكدت أن المسألة من الممكن، بل من الواجب، إما أن ننتظر حتى يفرغ البيولوچيون من وضع تصورٌ لها، وإما أن ندرس تصرفاتها على ضوء نظرية النُّظم المعقدة واللاخطية والديناميكا الطبولوچية، وهذا ما قمت به."

كان له ذات يوم معمل ملئ بالبعوض فى أقفاصه، وكما يعلم كل من ابتلى بلدغاته، فهو يحرم عند الغسق من كل يوم. وحين ضبطت درجة الحرارة بحيث لا تبيّن الليل والنهار، اتضح أن الساعة الداخلية للبعوض ليس قوامها الأربع والعشرين ساعة المعتادة، بل ثلاث وعشرون. أما ما يجعله متوافقا مع يومنا المعتاد، فهو جرعة الضوء الذى يتلقاه، فهو يعيد بها ضبط ساعته.

وعن طريق تسليط الضوء، أمكن له أن يقدّم أو يؤخّر من ساعة البعوض البيولوچية. وقام برسم التأثير مقابل توقيت الجرعات، وبدلا من أن يبحث الأمرمن زاوية الكيمياء البيولوچية، نظر إليه من زاوية الطوبولوچيا، بمعنى أنه بحث فى الجوانب الوصفية للبيانات، بدلاً من الجوانب الكمية. ثم وصل إلى نتيجة مذهلة: توجد نقطة **تفرُّد** singularity فى الشكل الهندسى، نقطة تختلف عن جميع النقاط، توقّع أن تكون ذات وضع خاص، فهى التوقيت المضبوط الذى معه تنهار الساعة البيولوچية للبعوض تماما، وأية ساعة بيولوچية أخرى.



شكل ١٠-١ الكيمياء الهيولية: هذه التموجات متحدة المركز أو اللولبية، والتى تنتشر إلى الخارج، هى علامات **للهيولية** وشوهدت فى **تفاعلات كيميائية** عديدة، مثل تفاعل Beluzov-Zhabotinsky. وقد وضع آرثر وينفرى نظرية بأن مثل هذه الموجات تشبه موجات النشاط الكهربى التى تعبر عضلات القلب، بانتظام أو عن عدم انتظام.

وكان التوقع مُدهشاً، ولكن التجارب أيدته؛ "تدخل فى منتصف الليل، وتُعطى البعوض جرعة محسوبة من الضوء، فتوقف ساعته البيولوجية، فتراه يحوم عشوائياً، ويظل كذلك طالما كان لك صبر على المراقبة، أو تعطيه جرعة ضوء أخرى. لقد سببت له دوارا أزليا". فى بداية السبعينات، لم يثر أسلوب وينفرى الرياضى فى دراسة الساعة البيولوچية اهتماما يذكر، كما كان من الصعب مدّ نطاق تجاربه على نوع راق من الكائنات لا يقبل البقاء فى قفص لشهور طويلة.

ظل موضوع الاضطراب الذى يصيب الناس نتيجة للتغير فى التوقيت بعد رحلات السفر الطويلة من الموضوعات المستعصية على الحل بالنسبة للبيولوجيين. وقد جمع الباحثون كماً وافراً من البيانات لعيّنات من البشر، خاصة من الطلبة والمتقاعدين،أو الأدباء والكتّاب حين يكون أمامهم عمل مطلوب إتمامه، ممن يقبلون بضع مئات من الدولارات فى الأسبوع لقاء المعيشة فى «عزلة عن الوقت» دون ضوء نهار، أو تغيّر فى درجة الحرارة، أو ساعات، أو هاتف. فالناس يتمتعون بدورة للنوم والاستيقاظ ودورة لدرجة حرارة الجسم. كلتا الدورتين عبارة عن مذبذب لاخطى يستعيد توقيته بعد شئ قليل من الاضطراب. وفى العزلة، حيث لايوجد مؤثر يعيد ضبط الوقت، بدت دورة الحرارة وكأن مُدّتها خمس وعشرون ساعة، حيث تنخفض الحرارة خلال النوم. ولكن اتضح للباحثين أنه بعد أسابيع من العزلة فإن دورة النوم تنفصل عن دورة درجة الحرارة، وتصبح شاذة، فيظل المرء لعشرين أو ثلاثين ساعة مستيقظا، ثم يتلو ذلك نوم لعشر أو عشرين ساعة. ولا يحس المرء بأن يومه قد طال لهذه الدرجة، بل ويرفض تصديق ذلك حين يُخبر به.

ولم يبدأ تطبيق أسلوب وينفرى على الآدميين إلاّ فى منتصف الثمانينات، أما بالنسبة إلى وينفرى نفسه، فقد تحول إلى دراسة نبضات القلب، وكان تحوله بعد رؤيته اثنين يموتان أمام عينيه بالسكتة القلبية، فى الواقع، لم يكن ليقول إنه قد تحول إلى تلك الدراسة، فالدراسة لم تتغير فإن اختلفت الكيمياء، فالديناميكا واحدة.

لماذا يتحول قلب هكذا فجأة، بعد أن استمر لبلايين المرات بين انقباض وانبساط، وتسارع وتباطؤ، لايكل ولا ينقطع عن خفقاته إلى هذا الاضطراب المميت فى دوراته؟

■ ■ ■

قصّ وينفرى القصة على **چورچ مينز** George Mines أحد الباحثين القدامى فى جامعة ماكجل بمونتريال. وتمكّن مينز من صناعة جهاز صغير عالى الدقة لإنتاج

نبضات كهربية للقلب. يقول وينفري: "حين قرر مينز أنّ الوقت قد حان لإجراء البحوث على الكائن البشري، اختار أقرب انسان تحت يديه، هو نفسه، وحين دخل مساعد المعمل صباحا، وجده مُسجّى على الارض، لاتزال الأجهزة الموصلة تقوم بدورها فى تسجيل بيانات النبضات وهى تتضاءل رويدا رويدا، بينما هو فى حالة من الغيبوبة لم يفق منها إلى أن فاضت روحه".

للإنسان أن يتوقع أن نبضة صغيرة للغاية، ولكن فى توقيت محدد بدقة عالية تماماً، يمكن أن تضع القلب فى حالة الارتجاف البطيني، ولعل مينز نفسه قد أدرك ذلك، قبيل دخوله فى الغيبوبة. أما النبضات غير الموقوتة فقد تصل قبل أو بعد النبضة التالية بقليل، بالضبط كما يحدث فى الساعة البيولوجية. ولكن الاختلاف الجوهرى بين القلوب والساعات البيولوجية، أن القلب شئ ملموس، يمكنك أن تمسكه بيديك، وأن تتبع الموجات الكهربية ثلاثية الأبعاد بداخله.

ولكن ذلك يتطلب عبقرية خاصة. لقد قرأ **ريموند آيدكر** Raymond E. Ideker من كلية طب جامعة ديوك Duke مقالا لوينفرى فى *Scientific American* عام١٩٨٣، ولاحظ أربعة تنبؤات حول استثارة وإيقاف الارتجاف البطينى مؤسسة على الديناميكا اللاخطية والطبولوجيا، ولم يصدّقها آيدكر فى الواقع،إذ بدت افتراضية بصورة كبيرة، علاوة على كونها، من وجهة نظره متخصص فى القلب، على درجة عالية من التجريد. على مدى ثلاث سنوات، تحققت النبوءات الأربع، وأصبح آيكر منكباً على برنامج متقدم لجمع بيانات أكثر ثراء لوضع منهج مؤسس على نظام ديناميكى لأبحاث القلب. كان، على حد قول وينفري، "المقابل للسيكلوترون" فى أبحاث القلب."

يقدم راسم القلب التقليدى عاما وحيد البعد، وخلال عملية القلب يمكن للجرّاح أن يأخذ إلكترودا ويمرره من موضع لآخر فوق القلب، جامعا صوراً تصل لخمسين أو ستين خلال عشر دقائق، وبذلك يحصل على صورة تجميعية. أما خلال الارتجاف البطيني، فهذا الأسلوب غير مجد، حيث تكون سرعة الارتجاف عالية للغاية. وقد كان لجهاز آيدكر، فى نظامه المؤسَّس على حاسوب يتابع الوقت الحقيقى real time، ١٢٨ ألكترودا على شبكة يمكن وضعها على القلب، تسجِّل الجهود الكهربية لكل موجة تصل لعضلة، ويخرج الحاسوب صورة قلبية.

كان هدف آيدكر المباشر، بالإضافة إلى اختبار فروض وينفري، هو تحسين الجهاز الكهربى الذى يوقف الارتجاف البطيني. ففريق الحالات الحرجة يحمل جهازا مستعداً لإنتاج صدمة قوية من التيار المستمر خلال حنجرة الشخص المصاب، وتجريبياً،

صمم خبراء القلب جهازاً صغيراً يمكن دسُّه فى الصدر للأشخاص الذين يُظن تعرّضهم لهذا الخطر، رغم أن التعرّف على مثل هؤلاء الأشخاص يمثل تحدياً فى حد ذاته. يظل هذا الجهاز قابعا، يستمع إلى دقات القلب المنتظمة، إلى أن تأتى اللحظة التى تحتاج منه أن يصدر نبضته. وأخذ آيدكر يجمع المعلومات الفيزيائية التى تجعل من جهاز كهذا اقل اعتمادا على التخمين، وأكثر اقترابا من العلم.

■ ■ ■

لماذا يجب أن يخضع القلب، ذو الأنسجة المتميزة، هذا هو السؤال الذى يحيّر العلماء فى ماكجرل ومعهد ماساسشتش للتكنولوجيا.

أجرى **ليون جلاس** Leon Glass ورفاقه فى مكجريل مجموعة أبحاث كانت حديث وقتها فى كل عالم الدراسات المتعلقة **بالديناميكا اللاخطية**. لقد استخدموا تجمّعات دقيقة من خلايا أجنّة الدجاج، بعمر سبعة أيام. هذه الخلايا الناقوسية، بعرض جزء لجهاز خارجي. كان النبض تماما خلال المجهر. كانت الخطوة التالية إدخال نبضة خارجية، وقد تم ذلك من خلال إلكترود دقيق أولج فى أحد الخلايا. كانت النبضة قابلة للتغير من حيث الشدة والإيقاع.

وأوجزت النتيجة فى مجلة العلوم عام ١٩٨١ فى العبارة التالية: "إن التصرفات الديناميكية الشاذة التى كشفت عنها الدراسات الرياضية والتجارب الفيزيائية يمكن بصورة عامة أن تكون موجودة فى الذبذبات البيولوجية حين تضطرب دوراتها. "لقد رأوا تضاعف الفترة، نموذج النبضات يتفرع ثنائيا ثم يتفرع مرة أخري، مع التغيّر فى المثير. وقد وضعوا خرائط بوانكريه، وخرائط دائرية يقول جلاس: "عن طريق رياضيات اللاخطية يمكننا فهم الإيقاعات المختلفة وترتيباتها فهماً جيدا للغاية. إن تدريب اطباء القلب لايحتوى على رياضيات اللاخطية ولكن طريقنا فى النظر لهذه المسائل هو الطريق الذى سوف يفعله الجميع فى المستقبل".

وفى هذه الأثناء، وجد طبيب القلب والفيزيائى **ريتشارد كوهين** Richard Kohen فى برنامج مشترك بين هارفارد وإم . أى. تى مدى واسعاً من تسلسلات تضاعف الفترات فى الكلاب. وقد استخدم نموذجاً حاسوبياً، أجرى عليه اختبارا لأحد السيناريوهات، فيها تتكسر موجة النشاط الكهربى على جزر الأنسجة، يقول: "إنها لحظة واضحة لظاهرة فايجنباوم، ظاهرة منتظمة تحدث عند تحقق شرط الهيولية. وقد اتضح أن النشاط الكهربى للقلب له تشابه مع العديد من الأنشطة التى تنتج الهيولية".

كما عاد علماء مكجريل إلى البيانات القديمة التى جمعت عن النشاط غير العادى للقلب. فى أحد الأعراض المعروفة، تختلط نبضات شاذّة مع أخرى عادية. وتفحص جلاس مع معاونيه هذه النماذج، وقاموا بإحصاء عدد النبضات العادية بنى النبضات الشاذة. كان العدد يختلف من شخص لآخر، ولكن لسبب ما كان العدد فرديا دائما، ولبعض الأشخاص، كان عدد النبضات العادية يتبع متسلسلة معينة ٢، ٥، ٨، ١١...

يقول جلاس: "قام البعض بمثل هذه الأعمال الإحصائية، ولكن الآلية لم يكن من السهل فهمها. كان هناك نظام معين، ولكن أيضا لانظام، إنها المقولة الشائعة فى هذا المجال، داخل الهيولية".

تقليديّا، يجرى التفكير فى الارتجاف البطينى فى اتجاهين، الكلاسيكى القديم يرى أن الإشارات الثانوية المحددة للإيقاع تأتى من مراكز شاذة داخل عضلة القلب ذاته، متعارضة مع النبضات الأصلية. وقد أيد باحثو مكجريل بدرجة ما هذه الفكرة، حين بيّنوا أن نبضات داخل أنسجة القلب تتعارض مع النبضات الآتية من مصدر خارجي، ولكن السبب فى نشأة هذه المراكز فى المقام الأول كان أمراً عصيّا على الفهم.

أما الاتجاه الثانى فلم يركز على نشأة النبضات، بل على طريقة انتقالها خلال القلب، وهو الاتجاه الذى اعتنقه باحثو هارفارد. لقد وجدوا أن الشذوذ فى الموجة، حين تدور فى حلقة مغلقة، يمكن أن يسبب "إعادة للدخول" ينتج عنه أن تقوم بعض الأجزاء فى النبض قبل أوانها، مانعة القلب من فترة التراخى المطلوبة لتنظيم الضخ.

وبالتركيز على طرق الديناميكا اللاخطية، تمكن كلا الفرقين من إدراك أن تغيّرا طفيفاً فى أحد العوامل، ربما تغير فى التوقيت أو القابلية للتوصيل، يمكن أن يخرج نظاماً مستقرا ليتصرف بصورة أخري. كما وجدوا أيضا أساسا مشتركا لدراسة مشاكل القلب بصورة شاملة، وربط صور من الاضطرابات كان يُظن سابقا ألا ترابط بينها. وبالإضافة لذلك، فقد كان وينفرى يظن أن كلا الفريقين، بالرغم من اختلاف المنهج، على حق. فمنهجه الطبولوجى يفترض أن الفكرتين هما فى الواقع فكرة واحد.

يقول ونيفرى: "إن الظواهر الديناميكية تثير بصفة عامة صوراً متعددة من الإلهام، والقلب ليس استثناء من ذلك، "كان أطباء القلب يأملون أن تؤدى الأبحاث إلى طرق علمية للتعرّف على أولئك المعرضين للأزمات القلبية، وتصميم أجهزة أفضل والوصول لعقاقير أكثر فعالية. وكان وينفرى يأمل أن تؤدى المنظور الرياضى الشامل لهذه المشاكل إلى تدعيم مجال لايزال فى طور الظهور فى الولايات المتحدة، البيولوجيا النظرية.

■ ■ ■

يتحدث بعض الأطباء اليوم عن "**الأمراض الديناميكة** dynamical dieseases"؛ أى أمراض اختلال النظم والانهيار فى التوافق والتحكم. فالنظم المتذبذبة طبيعيا، تتوقف عن الذبذبة بصورة شاذة، وتلك التى من طبيعتها الثبات، تدخل فى حالة من الذبذبة. تتضمن هذه الاعراض اضطرابات التنفس، والتى يمكن أن تسبب الوفيات عند الأطفال. كما قد يحدث اضطراب فى نظام الدم، ينتج نوعا من أنواع اللوكيميا، واختلال فى نسبة الأجسام البيضاء والحمراء. ويعتقد بعض الأطباء أن الشيزوفرانيا، وبعض صور الاكتئاب، ربما تكون لنفس السبب.

ولكن الأطباء نظروا للهيولية أيضا كمظهر للصحة. فمن المعروف منذ زمن أن التغذية الخلفية تقوم بدور إيجابى فى استقرار نظم التحكم. فبىساطة، تجد أن النظم الخطية حين تدفع فى اتجاه ما، تظل مستقر عليه. أما النظم اللاخطية، فحين تتلقى دفعة كهذه، تميل للعودة إلى وضعها الأصلي. وقد واجه **كرستيان هايجنز** Christian huygens، العالم الفيزيائى الهولندي، الذى اخترع البندول فى القرن السابع عشر وكذا علم الديناميكى الكلاسيكي، على مثال عظيم لهذا النوع من التحكم، فقد لاحظ ذات يوم أن مجموعة من البندولات قد أخذت تتحرك فى تزامن دقيق، وكان يعلم أنها لايمكن عمليا أن تصل لهذه الدرجة من التزامن، وليس فى مبادئ الرياضيات ما يفسر ذلك. وقد استنبط هايجنز، وكان محقا، أنها متوافقة عن طريق الاهتزازات التى تنتقل عبر الحائط الخشبى. هذه الظاهرة، والتى بها تتحكم ذبذبة فى أخرى فتجبرها على اتباع خطواتها، يسمى "**تثبيت النسق** mode locking" وهى الخصيصة التى تفسر استمرار مواجهة القمر للأرض بوجه واحد، وكذا ميل الأقمار الصناعية إلى اللف (الدوران حول نفسها) عددا من المرات يمثل نسبة من عدد صحيح من مسارها (دورانها حول الأرض)، كأن تكون ١:١ أو ١:٢ أو ٣:١ وهكذا، فكلما اقتربت سرعة اللف من عدد صحيح من سرعة المسار، حدث تثبيت لسرعة اللف عند قيمة العدد الصحيح. وفى تكنولوجيا الإلكترونيات، يحدث تثبيت للنسق بين تردد دائرة الاستقبال والموجات المستقبلة، حين يوجد اختلاف طفيف بين الترددين. وتمكن ظاهرة تثبيت النسق مجموعة من الأشياء المهتزة، بما فيها الأشياء البيولوجية، كخلايا القلب والخلايا العصبية، من أن تعمل فى تزامن تام.

مع هذه الظاهرة يثور التساؤل حول قضية الرسوخ، لأى مدى يمكن لنظام أن يتحمل الصدمات، وعلى نفس الدرجة من الأهمية للنظم البيولوجية موضوع المرونة، إلى أى مدى يمكن للنظام أن يعمل على ترددات متغيّرة فالتثبيت على نسق معين يمكن

ان يمنع النظام من تكييف نفسه مع تغير الظروف. فالكائنات يجب أن تواكب التغيرات التى تحدث فى بيئتها بصورة فجائية وسريعة. فلا يمكن أن يقيّد الجهاز النفسى عند نسق ثابت، ويسرى الأمر على بقية الأجهزة الأكثر دقة. وقد اقترح بعض الباحثين، منهم **آرى جولدبرجر** Ary Goldberger من كلية طب جامعة هارفارد، أن يكون النظام الدينامیكی السليم مميزا بهيكل فراكتلي، مثل تفرع الأنابيب الهوائية فى الجهاز التنفسى وألياف التوصيل فى القلب، بحيث يتيح العمل عند مدى واسع من الإيقاعات. وقد لاحظ جولدبرجر، مستعيدا آراء روبرت شو، أن "العمليات الفراكتلية المصحوبة بطيف واسع من تعدد المقاييس غنية بالمعلومات. بينما الحالات الترددية فى المقابل تعكس طيفاً ضيقا، فهى محددة بتكررات مقبضة، عارية عن المعلومات. "وقد أقترح مع بعض الباحثين أن معالجة هذه الاضطرابات قد تعتمد على توسيع مجال النظام، أى قابليته العمل على مدى واسع من الترددات دون الوقوع فى قبضة تثبيت النسق.

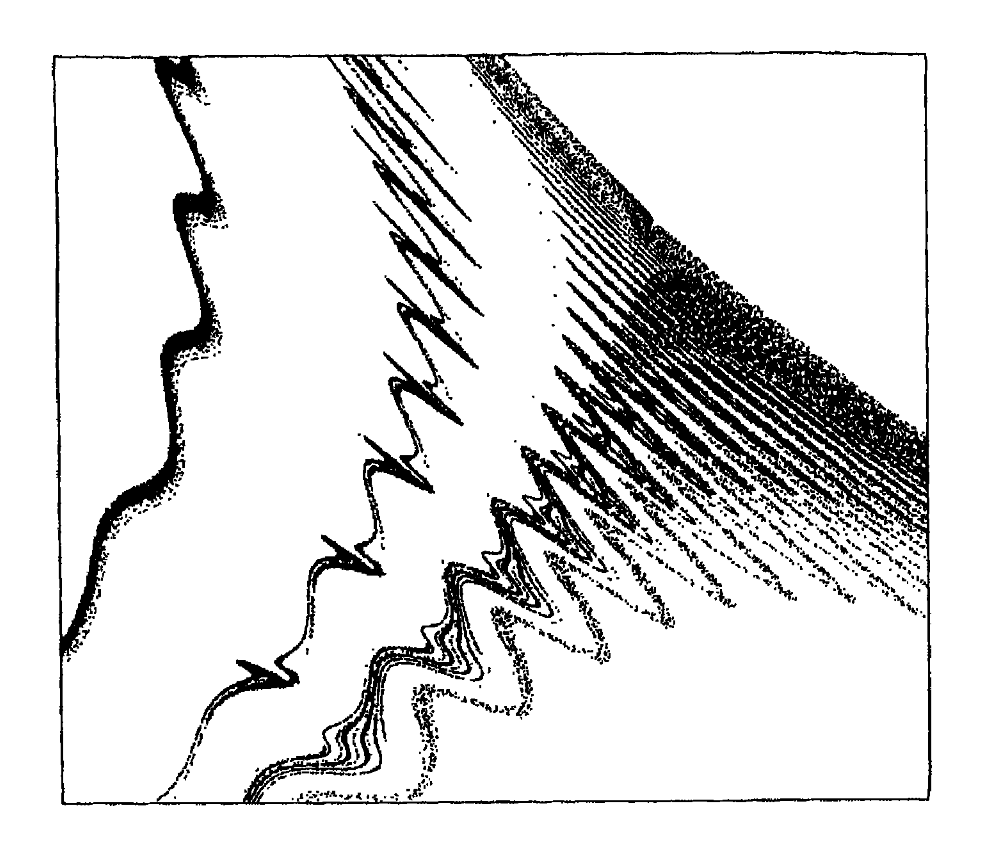
وقد توسّع **أرنولد ماندل** Arnold Mandell، طبيب وعالم فى النظم الديناميكية، فى دور الهيولية فى الطب، فهو قد تحول إلى دراسة الهيولية عام ١٩٧٧، حين وجد "تصرّفات غريبة" فى بعض أنزيمات المخ لايمكن تبريرها إلا عن طريق نوع حديث من رياضيات اللاخطية. وقد شجع على دراسة البروتينات كنظم ديناميكية، بدلاً من الاكتفاء بدراستة أشكالها الاستاتيكية.

وهو يرى أن الأبحاث الجديدة فى الهيولية يجب أن يكون لها دور فى علاج الحالات العصبية، واعتبار محاولة علاج كافة الحالات، من القلق إلى الأرق إلى الشيزوفرانيا، عن طريق العقاقير فقط هو اتجاه فاشل، فالنادر من المرضى هم من تم شفاؤهم بهذا الاسلوب. إن التحكم فى أعنف الأمراض العصبية بهذا الاسلوب أمر ممكن، ولكن، ماذا على المدى الطويل؟ وقد بين لزملائه بالأدلة القاطعة أن بعضا من هذه العقاقير تزيد المرض سوءا، وأن بعضاً منها محدود النجاح.

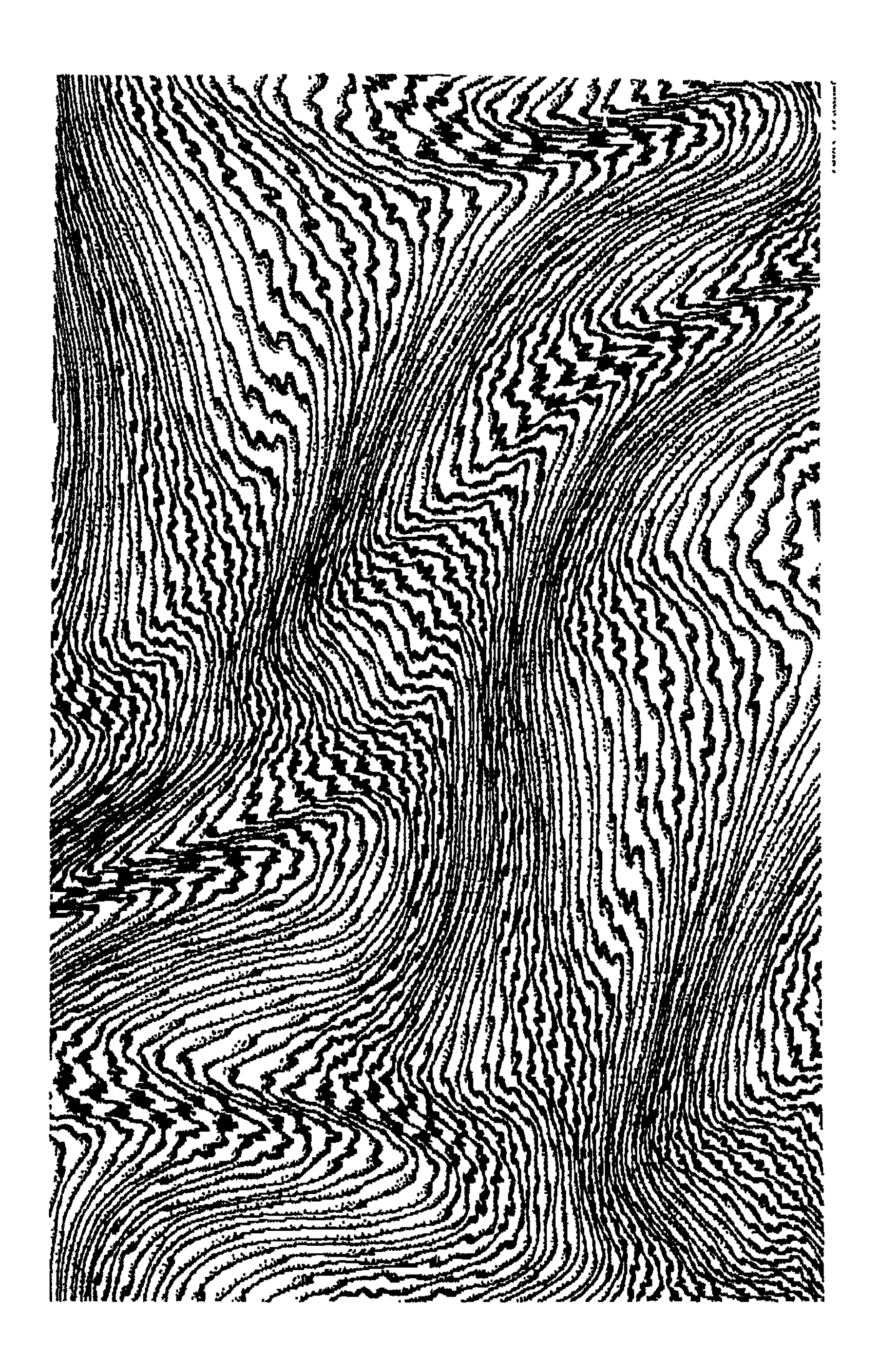
فبالنسبة له، كان يرى أن المسألة تكمن فى المفاهيم، فالطرق التقليدية خطية **جزيئية**، خطُّها الفكرى هو: جين ـــ ببتيد ـــ أنزيم ـــ مرسل عصبى ـــ تصرف ـــ عرض مرضى ـــ عقار. هذا الخط الفكرى يحكم كافة الأبحاث وصور العلاج فى الطب العقلى حتى أن المخ ذاته ينظر إليه كلوحة توصيلات كهربية. ولايملك أى انسان على دراية بالديناميكا اللاخطية إلا أن يعلّق: "يا للسذاجة!" وقد أخذ يحث زملاءه على فهم التدفّقات الهندسية التى تكمن وراء النظم المعقدة كالمخ.

وقد اتجه علماء آخرون إلى تطبيق مفاهيم الهيولية على موضوع الذكاء الاصطناعى. فديناميكية النظم تغرى أولئك الذين يبحثون عن طريقة لنمذجة الرموز والذاكرة فالفيزيائى الذى ينظر للأفكار على أنها مناطق ذات حدود غير واضحة المعالم، منفصلة ولكن متداخلة، تتجاذب كمثل المغناطيسات ولكن تسمح بالتباعد، سوف يلجأ بالتأكيد إلى **فضاء الطور** وما به من "**أحواض** basins للتجاذب"[iii]. هذه النماذج يبدو أن لها الخصائص المطلوبة، نقاط من الاتزان مختلطة بعدم الاتزان، مناطق من حدود متبادلة، يقدم هيكلها الفراكتلى هذه الخاصية من المرجعية الذاتية اللانهائية التى يبدو أنها محور مقدرة المخ على الازدهار بالأفكار والقرارات والعواطف، وكل ما يدخل فى صرح الوعي. فبالهيولية أو بدونها، لايمكن لعلماء الإدراك أن ينمذجوا المخ كشئ استاتيكي. إنهم يدركون تدرج المقاييس، من الخلية العصبية فصاعدا، والتى تعطى تبادلا بين ما هو على مقياس مرئى وماهو على مقياس متناه فى الصغر، والذى يميز اضطرابات السوائل والعمليات الديناميكية المعقدة الأخرى.

الأنماط تخرج من بين ماليس له شكل محدد، هذه هى الصفة الجمالية للبيولوجيا وسحرها الأول، فالحياة تمتص النظام من بحر لانظام به. وقبل عصر الهيولية لم يكن هناك رياضة ولافيزياء لديها من الوسائل ما يمكنها من أن تقوم بتحليل اللانظام فى وحدات الحياة ا لأساسية، والآن، اصبحت هذه الوسائل متاحة.



شكل ١٠-٢ الهارمونية الهيولية Chaotic harminies. تنتج التفاعلات بين الإيقاعات، كترددات الراديو أو مسارات الكواكب، صورة من الهيولية الفراغية. الصورة فى أسفل وفى الصفحة المقابلة هى صور حاسوبية لبعض "الجاذبات" التى يمكن أن تنتج حينا تتفاعل ثلاثة إيقاعات معا.





شكل ١٠-٣ التدفُّقات الهيولية: يتسبب قضيب جذب خلال سائل لزج في خلق شكل متموج بسيط، ما جذب عدة مرات، تولّدت أشكال أكثر تعقيداً.



i حالة يعرفها من عايش الانتقال بين مصر وأحد بلدان القارة الأمريكية أو الشرق الأقصى، حيث يظل لعدة أيام غير قادر على التأقلم مع التغير المفاجئ فى التوقيت، ويطلق عليها "jet lag"، ويقصد به التأثير الناتج عن ركوب الطائرات النفاثة العابرة للقارات. المترجم.

ii معجل الجسيمات فى المفاعلات الذرية. المترجم.

iii يُراجَع ما قيل حول عدم قطعية الحدود بين مناطق الجاذبات فى *الفصل الثامن*. المترجم.



الهيولية وما بعدها

فى مطلع الستينيات من القرن العشرين، كان لورنتز يفكّر فى الطقس، وهينون فى النجوم، وماى فى توازن الطبيعة. وكان ماندلبروت رياضيا مجهولا فى مركز أبحاث آى بى إم، وفايجنباوم لم يتخرج بعد، وفارمر صبياً يلهو فى نيو مكسيكو.

كان أغلب العلماء إلى ذلك الحين يشتركون فى معتقدات معينة حول التعقد تُؤخَذ كقضايا مسلَّم بها، حتى ولو لم تُصغ فى كلمات أو توضع موضع الاختبار. لقد آن الأوان أخيرا لمراجعتها وتمحيصها.

- النظم *البسيطة* تعمل بطرق *بسيطة*. إن أداة ميكانيكية بدائية كالبندول، أو دائرة كهربية بسيطة كمذبذب جهاز للاتصالات، أو تصوروا لتعداد مثالى لسمك فى بركة– بقدر ما يمكن لنظم كهذه أن تخضع لقوانين بسيطة تحديدية ومنضبطة تماما، فإن تصرفها على المدى البعيد يكون قابلاً تماما للتنبؤ.
- والنظم *المعقدة* تعنى أسبابا معقدة، جهاز ميكانيكى معقد، أو دائرة لجهاز كهربى متقدِّم، أو تعداد جنس من الكائنات فى الأحراش، أو تدفُّق لتيار متلاطم، أو عضو فى جهاز بيولوجي، أو جسيم فى إشعاع، أو عاصفة جوية، أو اقتصاد لدولة– مثل ذلك من نظم لا تنفك عن التغير، فهى بعيدة عن الاستقرار، وغير قابلة للتنبؤ أو للتحكم، إما لأنها تحكم بعوامل متعددة لا رابط بينها أو لأنها تتأثر بمؤثرات خارجية عشوائية.
- والنظم *المختلفة* تتصرف بطرق *مختلفة*، فالعالم البيولوجى الذى ينكبُّ لسنوات على دراسة كيمياء العصبية فى جسم الانسان، ومهندس الطيران الذى يستخدم الأنفاق الهوائية لحل مشكلة فى الديناميكا الهوائية، وعالم الاقتصاد الذى يحلل سيكولوجية قرارات الشراء– علماء كهؤلاء يعلمون أن العوامل التى تتحكم فى مجالاتهم مختلفة كل الاختلاف، فيظنون بداهة أن نظمهم المعقدة لابد أن تختلف فيما بينها كل الاختلاف.

والآن، تغيّرت هذه المفاهيم كليّةً. فعلى مدى عشرين عاماً وضع علماء الفيزياء والرياضيات والبيولوجيا والفلك مجموعة مخالفة تماماً من الأفكار: النظم *البسيطة* قد تؤدى إلى تصرفات معقدة، والنظم قد تنتج عن أسباب بسيطة، والأهم من هذا كله، إن قوانين النظم *المعقدة* قد تنتج عن أسباب *بسيطة*، ،الأهم من هذا كله، *إن قوانين النظم المعقدة قوانين عامة، لا اعتبار فيها* بخصوصيات *المجال الذى تعمل فيه.*

فبالنسبة للغالب من العلماء التطبقيين، سواء الفيزيائيين أو الأطباء العصابيين أو حتى الرياضيين فهم سائرون على دربهم المعتاد، ولكنهم اصبحوا على وعى بشىء يُدعى الهيولية، وأن بعض الظواهر المعقدة قد تم تفسيرها، وأن ظواهر أخرى تحتاج إلى تفاسير جديدة. فعالم يدرس التفاعلات الكيمائية فى مختبر، أو يتقصى تعداد حشرة فى حقل تجارب، أو يضع نموذجا لدرجة حرارة المحيط، لايمكنه أن يظل على انفعاله القديم لما يحدث من تذبذبات فجائية، أو أن يتجاهلها. ويعنى هذا لدى البعض الدخول فى المشاكل. فهم يعلمون أن الاموال قد خصصت للدراسة فى هذا المجال ذى المسحة الرياضية، ويتزايد إدراكهم بأن الهيولية تقدم وسيلة حديثة للتعامل مع البيانات القديمة، والتى نسيت فى الأدراج لكونها قد اعتبرت شاذة. كما يتزايد إدراكهم بعدم جدوى دراسة الأمور عن طريق تجزئتها. فالهيولية تعنى نهاية الاتجاه نحو البرامج العلمية الشمولية.

عدم الفهم، المقاومة، الغضب ثم القبول، لم ينج أحد من روّاد الهيولية من التعرض لهذه المشاعر. يذكر **جوزيف فورد** محاضرة له، بيّن فيها التصرفات الهيولية الكامنة فى إحدى المعادلات، وكيف تقافز أغلب الحضور استنكارا، من منطلق أنه اختلاق لم يسمع به من قبل، يقول عن ذلك: إن الذى لم أفهمه هو الروح العدائية التى سادت".

جالسا فى ا سترخاء فى مكتبه بأطلانطا، كان **فورد** يعبّ الصودا من قدح ضخم مكتوب عليه "Chaos" يتذكر مساعده الأصغر عمرا رونالد فوكس حين اشترى حاسوبا من طراز أبل، فى وقت لم يكن باحث محترم يعبأ بشراء مثل هذه الأشياء لأبحاثه. كان قد سمع أن فايجنباوم قد اكتشف عدة قوانين عامة تصف تصرفات الدوال المحتوية على تغذية خلفية، فقرر أن يكتب برنامجاً يرى به مثل هذا التصرّف على شاشة جهازه. ورآه زاهى الألوان أمام عينيه؛ التفرع الثنائى، خطوط مستقرة تنقسم إلى قسمين، ثم كل قسم إلى قسمين، ظهور الهيولية بذاتها، ثم فى ثناياها، الانتظام الهندسى المدهش. هكذا ساهم التعليم الذاتى فى إقناعه وآخرين بما لم تستطع المقالات المكتوبة فعله.

لعب بعض العلماء بمثل هذه البرامج ثم توقفوا، بينما لم يستطع آخرون مقاومة التغير. كان فوكس من الواعين بقصور التحليل الخطي، مدركا لما يحدث حين تُنحّى الظواهر اللاخطية جانبا. إن لسان حال عالم يقوم بذلك هو إنها مشكلة تتطلب منى الرجوع إلى مراجع عن الدوال الخاصة، وهو آخر شئ أود أن أفعله، ولست بالذى يبحث عن آلة تقوم بهذا العمل عني، فأنا أرفع من ذلك".

يقول فوكس: "إن الصورة العامة للاخطية قد جذبت انتباه الناس، ببطء فى البداية، ثم ازدادت السرعة. وكل إنسان فكر فى الأمر، جنى ثماره. انظر الآن لمشكلة تعرضت لها من قبل، بصرف النظر عن المجال التى تعمل به، ستجد أنك عند نقطة ما تركت المشكلة بسبب اللاخطية. الآن يمكنك الرجوع إليها، إذ تعلمت كيف تواجهها".

ويقول فورد: "إذا كان لمجال أن ينمو، فإنما يكون ذلك لأن جمهرة من الناس رأوا فى ذلك فائدة جمة لهم".

ومع ذلك، فليس الجميع متفقين على مصطلح "chaos" فى حد ذاته، فهو يقصر عن إظهار مضمون هذا العلم الجديد، والذى يتمثل فى رأى البعض منهم فى الأوصاف التالية:

* فيليب هولمز Philip Holmes، رياضى وشاعر أبيض اللحية من كورنل: المسارات الجاذبة المعقدة واللادورية للنظم الديناميكية (قليلة الأبعاد عادة)

* هاو باى-لين Hao Bai-Lin الفيزيائى الصينى الذى جمع قدراً مهولاً من مقالات الهيولية فى كتاب مرجعى: نوع من النظام بدون دورية. و: مجال سريع التطور من الأبحاث تشاركت فيه الرياضيات والفيزياء وديناميكا الموائع والعلوم البيئية وكثير من المجالات العلمية الأخري. و: طراز من ظواهر طبيعية عامة تم التعرّف عليها حديثا.

* هـ. بروس ستيوارت H.Bruce Stewart رياضى تطبيقى من معمل بروكهافن القومى فى لونج آيلاند: تصرف تكرارى عشوائى ظاهريا لنظم بسيطة تحديدية.

* رودريك ف. جينسن Roderick V. Jensen من جامعة ييل، فيزيائى نظرى يبحث فى احتمال الهيولية الكميّة quantum chaos: التصرف غير المنتظم وغير القابل للتنبؤ لنظم ديناميكية تحديدية غير خطية.

* جيمس كرتشفيلد من جماعة سانتا كروز: ديناميكية ذات إنتروبيا مترية metric entropy موجبة ولكن محدودة finite، والترجمة الرياضية لذلك: تصرّف

ينتج المعلومات، ويكبر من الدرجات الطفيفة من عدم التأكد، ولكن ليس غير قابل للتنبؤ كلية.

* أما بالنسبة لفورد، الذى يعتبر نفسه حواريا للهيولية: ديناميكية تحررت أخيراً من أغلال النظام والدورية.. نظم تحررت لتستكشف على حريتها كافة احتمالاتها الديناميكية.. ثراء مدهش من الخيارات والفرص.

وقد اعتبر **جون هبارد** وهو ينقص الدوال التكرارية **وأشكال ماندلبروت** المتشعبة مصطلح chaos **اسما فقير التعبير، لكونه يعنى ضمنيا العشوائية**. ففى رأيه أن الرسالة الجوهرية فى الأمر أن العمليات البسيطة فى الطبيعة يمكن أن تنتج صروحاً هائلة من التعقد دون عشوائية. ففى **اللاخطية والتغذية الخلفية** يكمن الوسائل اللازمة لتكويد ثم فك التكويد لهياكل تصل من الثراء إلى درجة **المخ البشرى**.

وبالنسبة لعلماء آخرين، مثل **آرثر وينفرى، الذى** يكشف الطبولوجيا الشاملة للنظم البيولوجية، فالمصطلح ضيق، حيث يعنى ضمنا النظم البسيط، خرائط فايجنباوم وحيدة البعد، وجاذبات رول الغربية ذات البعدين أو الثلاثة، أو الأبعاد الكسرية.

وبالنسبة لعلماء آخرين، مثل آرثر وينفري، الذى يستكشف الطبولوجيا الشاملة للنظم البيولوجية، فالمصطلح ضيق، حيث يعنى ضمنا النظم البسيطة، خرائط فايجنباوم وحيدة البعد، وجاذبات رول الغربية ذات البعدين أو الثلاثة، أو الأبعاد الكسرية. فالهيولية قليلة الأبعاد فى رأيه حالة خاصة، وكان اهتمامه منصبّاً على قوانين التعقد كثير الأبعاد، وكان مقتنعا بوجود هذه القوانين فيبدو أن قدراً كبيراً من الكون خارج عن نطاق الهيولية قليلة الأبعاد.

حملت مجلة الطبيعة جدلاً دائراً حول ما إذا كان طقس الكرة الأرضية يتبع جاذبا غريبا. وقد بحث المحللون الاقتصاديون فى تقلبات البورصة عن جاذب غريب مميّز ولكن لم يعثروا على شئ من ذلك حتى الآن، وقد استفاد علماء الديناميكا من وسائل الهيولية لتحليل الاضطرابات تحليلا وافيا. وحين كان ألبرت لبشابر جديداً فى كلية شيكاغو، كان يجرى أسلوبه التجريبى الرشيق لدراسة الاضطرابات، بصندوق يحوى الهليوم السائل أكبر كثيرا من خليّته عام ١٩٧٧. هل تكتشف هذه التجارب، التى تطلق اضطراب السائل فى الزمن والفراغ معا، وجود جاذبات بسيطة؟ لا أحد يعلم حتى اليوم. يقول هبرمان: "لو أنك أخذتنا إلى نهر مضطرب، وأدليت به مجسّاً وقلت: انظروا، هنا جاذب غريب، فسوف نخلع جميعا قبعتنا لكى ننظر".

كانت الهيولية مجموعة من الأفكار أقنعت كلَّ هؤلاء العلماء أن بينهم مشروعاً مشتركا. فيزيائيون أو رياضيون أو بيولوجيون، اقتنعوا جميعا أن النظم البسيطة التحديدية يمكن أن تولِّد تعقيدا، وأن النظم المستعصية على التحليل الرياضى التقليدى لفرط تعقدها تخضع لقوانين بسيطة، وأ مهمتهم، على اختلاف مجالاتهم العلمية، أن يفهموا التعقّد فى حد ذاته.

■ ■ ■

كتب **جيمس لفلوك**، واضع فرض الجايا: "لننظر مرة أخرى إلى قوانين الديناميكا الحرارية، إنها تبدو لأول وهلة وكأنها جحيم دانتي" ولكن..

إن القانون الثانى الثانى يزفُّ نبأً سيئاً خرج من ثنايا العلم ليستقر بثبات فى الثقافة غير التخصصية، كل شئ مآله العشوائية. كل عملية تحويل للطاقة من صورة لأخرى يجب أن تتضمن مقدارا مفقودا يتسرب على صورة حرارة مشتتة، فالكفاءة التامة فى صورة تحويل الطاقة أمر مستحيل التحقيق، والكون يسير فى اتجاه واحد، فالإنتروبيا يجب أن تتزايد فيه وفى أى نظام منغلق على نفسه. ومهما كانت صياغته، فالقانون الثانى محكم لامجال للفكاك من قبضته. هذا صحيح فى نطاق الديناميكا الحرارية، ولكن له صدى أيضا فى مجالات أبعد ما تكون عن هذا المجال، فقد اعتُبر هو المسئول عن تحلل الحضارات، وانهيار النظم الاقتصادية، وتردى الاخلاق، وغير ذلك من ظواهر للتغير نحو التشتت. هذا التجسيد المعنوى لقانون الثانى لم يعد يعتقد به اليوم، ففى عالمنا، حيث تزدهر الظواهر المعقدة، يجد الباحثون عن فهم أفضل لظواهر الطبيعة بغيتهم فى مفهوم **الهيولية**.

فحين ينحدر الكون بعد حين إلى **الإنتروبيا** القصوي، حيث التوازن الحرارى الكامل، سوف يتمكن بصورة ما من خلق هياكل مثيرة. فالعلماء المهتمون بطريقة عمل قوانين الديناميكا الحرارية يدركون مدى الحيرة أمام هذا السؤال: "كيف يمكن لتدفق غير هادف للطاقة أن تنتج حياة ووعيا فى الكون؟". وتعقيدا للموضوع بدرجة أكبر، نجد المفهوم الهلامى **للإنتروبيا**، حيث يكون تحديدها واضحا فى نطاق الديناميكا الحرارية، بمدلول الطاقة الحرارية ودرجات الحرارة، ولكنها كمعيار للعشوائية صعبة التعريف بدرجة مزعجة. لقد عانى الفيزيائيون ما فيه الكفاية لقياس درجة الانتظام فى الماء، وهو يتبلور إلى ثلج، بينما الطاقة تتشتت منه خلال ذلك. ولكن حين نأتى إلى خلق الأحماض الأمينية، أو الكائنات المجهرية، أو التكاثر الذاتى فى النبات أو الحيوان، أو

نظام معلوماتى معقد كالمخ، فإن الإنتروبيا الديناميكا الحرارية تفشل فشلاً ذريعاً فى وضع معيار لدرجة التحول من أشياء لاشكل لها إلى ما هو ذو شكل محدد. بالتأكيد هذه الجزر المتطورة إلى النظام يجب أن تخضع للقانون الثاني، أما القوانين الأساسية، القوانين المتعلقة بالخلق، فهى من مكان آخر.

تصنع الطبيعة الأنماط، منها ما هو منتظم فى الفراغ ولكن غير منتظم مع الزمن، ومنها ماهو على العكس، منتظم مع الزمن وغير منتظم فى الفراغ. ومن الأنماط مع هو فراكتلى، يحتوى على تماثل ذاتى على تدرج مستويات المقاييس. ومنها ما يستقر على حالة ثبات، أو حالة من التذبذب الدوري. لقد أصبح تكوّن الأنماط فرعاً قائماً بذاته فى الفيزياء وعلم المواد، يسمح للعلماء أن يضعوا نماذج لتجمع الجسيمات، ولتشتت الشحنات الكهربية، ونمو البلّورات فى تكوُن الثلج وسبائك المعادن. تبدو الديناميكية أوليّة بدرجة كبيرة، أشكال تتغير فى الفراغ وفى الزمن، ولكن اليوم فقط وُجدت الوسائل لفهمها.إنه من حقك اليوم أن تسأل عالم الفيزياء: "لماذا تختلف أشكال كِسَف الثلج؟؛

تتكون بلورات الثلج فى وسط من هواء مضطرب، جامعة بين التماثل والهيولية، الجمال الكامن فى شكل غير محدد الملامح. فحين يتجه الماء نحو التجمّد، فإن البلّورات تبرز نتوءات، وتنمو هذه النتوءات، وتكون حوافها غير مستقرة، وتتشعب منها نتوءات أخرى من الجوانب. وتخضع كسف الثلج لقوانين رياضية على درجة مدهشة من الخفاء، ومن ثم فقد كان من المستحيل أن يُتوقّع حجم النتوءات أو سرعة نموّها، أو إلى أى مدى يكون تفرّعها.وقد قامت أجيال من العلماء بوضع رسومات تخطيطية وتصانيف الأنماط المختلفة، صفائح وأعمدة اسطوانية، بلورات متضاعفة، إبر وتفرّعات، وتعالج الأبحاث تكون البلورات كنوع من تصنيف المواد، حيث ليس أمامهم طريق أفضل.

ويعرف عن نمو مثل هذه النتوءات والتفرّعات أنها مسألة على درجة عالية من اللاخطية، متعلقة بالحدود الحرة غير المستقرة، بمعنى أن النماذج يجب أن تتبع حدوداً معقّدة متأرجحة وهى تتغير بصورة ديناميكية. وحين يكون التصلّب من الخارج للداخل كما هو فى حالة تجمد الماء فى طبق، تكون الحواف بصورة عامة مستقرة وناعمة، وتكون السرعة محكومة بالمقدرة على التخلص من الحرارة. ولكن حين تتجّمد البلورات بدءاً من بذرة أولية فى اتجاه الخارج، كما هو الحال فى تكون **كسف الثلج**، حيث تقتنص قطيرات الماء وهى متساقطة خلال الماء المشبّع بالرطوبة، تكون العملية غير

مستقرة. فأى بروز يتفوق بقدر ضئيل يكون فى ميزة لاقتناص قدر أكبر من القطيرات، ويكون التفرع فى اتجاهه، وكذلك تتوالى التفرعات.

كان من نواحى الصعوبة تحديد أى نوع من القوى له أثر فعال، وأيها يمكن إهماله دون خطأ يُذكر. وقد أدرك العلماء منذ زمن أن العامل الجوهرى هو القدرة على تشتيت الحرارة خلال تجمّد الماء. ولكن الفزيائيين العاملين فى مجال تشتت الحرارة كانوا عاجزين تماما عن تفسير ما يراه الباحثون تحت مجاهرهم من أنماط مختلفة. ومؤخراً أدخل العلماء عاملاً آخر، التوتر السطحى. إن القلب من النماذج الحديثة لتكون كسف الثلج هى الهيولية، التوزان الدقيق بين قوى التوازن وقوى الإخلال به. تفاعل قوى بين قوى على مستوى الذرّات وقوى على مستوى العالم الملموس.

تشتت الحرارة يسبب عدم الاتزان، **والتوتر السطحى** يسبب الاتزان، فجذب التوتر السطحى يجعل المواد تفضّل الأسطح الملساء، مثل سطح فقاعة الصابون، بينما خشونة الأسطح تكلف طاقة، ويكون التوازن بين هذين الاتجاهين معتمداً على حجم البلّورة. فبينما يعمل التشتت على مقياس كبير، يعمل التوتر السطحى على المستوى المجهرى.

وتقليدياً، كانت قوى التوتر السطحى يتم تجاهلها لصغرها بالنسبة للأغراض العملية. ليس الأمر كذلك، فقد بينت أدق المقاييس أنها أيضاً مهمة بدرجة خطيرة، حيث يكون تأثير السطح حسّاسا للغاية للهيكل الجزئى للمادة المتجمّدة. وفى حالة الثلج، فإن التماثل الطبيعى للجزيئات يؤدى إلى تفضيل كامن للنمو فى ستة اتجاهات. ولدهشتهم البالغة، وجد العلماء أن خليط الاتزان وعدم الاتزان قد نجح فى تكبير هذا التفضيل الكامن، منتجا نظاماً للعمل شبه فراكتلى يصنع الكسَف. لم تأت الرياضيات من علماء الطقس، بل من الفيزيائيين وعلماء المواد، والذين كان لهم اهتمامهم بالموضوع أيضاً. وفى المعادن يكون التماثل الجزيئى مختلفاً، وعلى ذلك تكون خصائص البلّورات، والتى تعين على معرفة قوة المعدن. ولكن الرياضيات واحدة، فقوانين بناء الأنماط قوانين عامة.

إن حساسية الاعتماد على الظروف الابتدائية تفيد ليس فى الهدم بل فى البناء. فحين تتساقط كسفة إلى الأرض، بعد أن تكون معلقة فى الهواء ساعة أو أكثر عادة، فإن الاختيارات حول ظهور بروز فى أية لحظة يعتمد على عوامل مثل درجة الحرارة والرطوبة ووجود شوائب فى الجو، فالستة بروزات لكسفة منفردة، منتشرة فى فراغ مليمتر واحد، تحس بنفس درجة الحرارة، ولأن قوانين النمو تحديدية للغاية، فإن التماثل يكون محافظا عليه تقريبا. ولكن الاضطراب فى الجو يكون بحيث أن كسفتين

متجاورتين سوف يسلكان مسارات مختلفة تماماً. وتسجِّل الكسف المختلفة كل ما صادفته من ظروف متغيرة، فتكون الاحتمالات المختلفة لانهائية أيضاً.

وتكون كسف الثلج ظاهرة غير توازنية، كما يحب الفيزيائيون القول. فهى نتاج لعدم التوزان فى سريان الطاقة من جزء من الطبيعة إلى جزء آخر. هذا السريان يحول السطح الخارجى إلى بروز، والبروز إلى تفرعات، والتفرعات إلى هيكل لم تره عين من قبل. وكما اكتشف العلماء مثل ذلك اللاتوازن الذى يخضع للقوانين العامة للهيولية، فإنهم نجحوا فى تطبيق نفس الطرق إلى مجموعة كبيرة من المسائل الفيزيائية والكيمائية. ويتوقع أن تكون البيولوچيا هو الموضوع القادم. ففى خلفية أذهانهم وهم يتطلعون على شاشات الحاسوب إلى التفرعات وهى تنمو، الطحالب وجدران الخلايا والكائنات الحية تتبرعم وتنقسم.

من التعقد على مستوى الجزيئات المجهرية إلى مستوى الحياة العامة، هناك طرق عديدة تبدو مفتوحة. ففى الرياضيات الفيزيائية ازدهرت نظرية التفرع الثنائى لفايجنباوم ورفاقه، وفى الأبحاث التجريدية للفيزياء النظرية يطرق العلماء موضوعات أخرى، مثل ذلك السؤال الذى لا يستقر حول **الهيولية الكمية** quantum chaos، هل تسمح ميكانيكا الكم بالظواهر الهيولية التى تسمح بها الميكانيكا الكلاسيكية. فى دراسة السوائل المتدفقة بنى ليبشابر صندوقه الدقيق للهليوم السائل، بينما كان **بيير هوهنبرج** Pier Hohenberg **وجينتر آلرز** Gunter Ahlers يدرسون الموجات القديمة **لتيارات الحمل**. وفى الفلك استخدم العلماء المتخصصون فى الهيولية اختلال التوازن الجاذبى لشرح وجود **الكويكبات**، ويستخدم العلماء فيزياء النظم الديناميكية لدراسة الجهاز المناعى للإنسان، بما فيه من بلايين الجزيئات، وما له من مقدرة على التعلم والتذكر والتعرف على الأنماط، وهم فى نفس الوقت يدرسون التطوّر، آملين أن يجدوا آليات عامة للتكيف. وأولئك الذين يضعون مثل هذه النماذج يرون سريعا هياكل تنسخ نفسها، وتتصارع، وتتطور عن طريق الانتخاب الطبيعى.

■ ■ ■

ساعدت هذه الأفكار العلم فى مجموعة على التقدم. على أنه لا الفلسفة ولا البرهان ولا التجربة منها ما يدفع باحثا للخروج عن خطه، مالم تثر حاجة ماسَّة لذلك. وقد حدث ذلك فى كل المجالات العلمية. ففى مجال البيئة، كان م.شافر M.Schaffer مثالاً لذلك.

كان شافر آخر تلاميذ **روبرت مكآرثر** Robert MaArther، عميد هذا المجال فى الخمسينات والستينات. وقد وضع مكآرثر تصوراً للطبيعة مؤسَّساً بقوة على التوازن الطبيعى. كان نموذجه مبنيا على افتراض أن التوازن يتحقق، وأن تعداد النباتات والحيوانات يظل قريبا منه. كان التوازن هو الخصيصة الركيزية، فبه يتحقق أفضل توزيع للمصادر الغذائية، وأقل فقد لها، وأن الطبيعة، إذا ما تركت وشأنها، فسوف تحسن التصرف.

بعد عقدين، أدرك آخر تلاميذ مكآرثر أن التصور البيئى المبنى على مفهوم التوازن مكتوب عليه بالفشل. فهذه النماذج التقليدية مخدوعة فى تحيّزها للخطية. فالطبيعة أكثر تعقداً، وقد رأى بدلا من ذلك، الهيولية آتية "تأخذ بالألباب، وتحمل شيئاً من تهديد، أشبه بزوبعة تسبق العاصفة، وفى هذه الحالة عاصفة لاخطية".

يستخدم **شافر الجاذبات الغريبة** لاستكشاف الوبائيات التى تُلمّ بالأطفال فى أمراض مثل الحصبة والجديرى. لقد بحث عن البيانات فى الولايات المتحدة وبريطانيا، ووضع النموذج الديناميكى، يماثل بندولا ذو حركة قسرية مخمدة. فالمرض ينتشر بسبب عودة الأطفال للمدارس، ويخمد عن طريق المقاومة الطبيعية. وقد تنبأ نموذجه بتصرفات مختلفة أشد الاختلاف لهذه الأوبئة. **الجديرى** قد يتغير دوريا، بينما **الحصبة** هيوليا. والذى حدث أن البيانات حققت تماما تنبؤ نموذج شافر. بالنسبة لعلماء الأوبئة التقليديين، كانت دورات انتشارها تبدو بلا تفسر، عشوائية ومشوشة. أما شافر، وبأسلوب **فضاء الطور**، بين أنها تخضع **لجاذب غريب**، ذى **بعد كسرى** حوالى ٥ر٢.

حسب شافر **رقم ليابنوف** ورسم **خرائط بوانكريه**، ورغم هيولية الجاذب، فإن قدرا من التوقع أصبح ممكنا بسبب الطبيعة التحديدية للنموذج. فعامٍ من انتشار الحصبة يتلوه عام من انحسارها. وبعد عام من انتشار متوسط، لا يحدث سوى تغيّر طفيف، وعام من الانتشار المنخفض ينتج أكبر قدر من عدم القدرة على التنبؤ. كما تنبأ نموذج شافر الأثر المخمد لحملات التطعيم، وهو تنبؤ لم يكن ممكنا بالوسائل التقليدية، فالإحساس بأن الوباء لايزال منتشراً خلال حملة تطعيم يعطى إحساسا خاطئا بفشلها.

على المستوى الجماعى والشخصى، تقدمت أفكار الهيولية فى اتجاهات مختلفة ولأسباب مختلفة. بالنسبة لشافر، كما للكثيرين غيره، كان التحول عن العلم التقليدى إلى الهيولية غير متوقع. لقد كان هذا ما نادى به مأى فى حملته عام ١٩٧٥، وقد قرأ بحثه، ولكنه تجاهله. كان يظن أن الأفكار الرياضية غير مناسبة للمجال الذى يعمل به. وقد نصحه أحد زملائه أن يقرأ للورنز، ولكنه لم يعبأ بالنصيحة.

بعد عدة سنوات كان مع جمع من تلامذته فى صحراء الأريزونا، يتتبعون أنواع الحشرات ويحللون النتائج رياضيا. وتمكن شافر من وضع نموذج يفسّر التغيرات فى أعدادها.

وفى عام ١٩٨٠ تأكد من أنه مخطئ تماماً. لقد انهار نموذجه، وتضاربت الآراء حول الأسباب، فمنهم من عزاها إلى تجاهل النمل، ومنهم من قال بأنه تغيّر الطقس غير المتوقع، وفكر شافر فى إدخال مزيد من العوامل على نموذجه، ولكن الإحباط كان حليفه. بعد ذلك، تغير كل شئ.

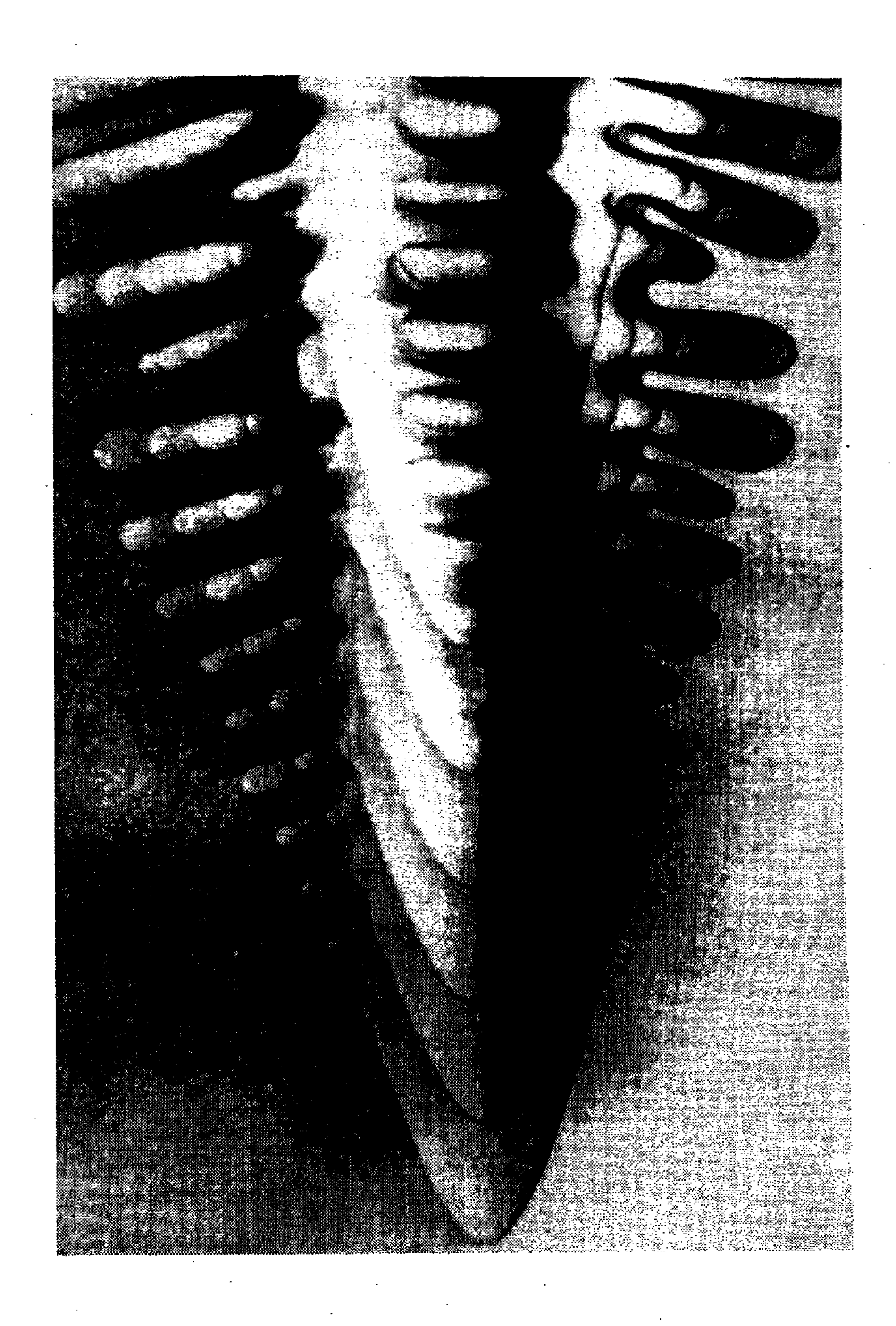
وقع تحت يديه بحث عن الهيولية فى التفاعلات الكيميائية. وشعر أن الكاتب قد مرّ بنفس تجربته، استحالة مراقبة العشرات الأنواع من الحشرات. مع ذلك، فقد نجح صاحب البحث حين فشل هو. ولقد قرأ عن طريقة رسم فضاء الطور، ثم قرأ للورنز، ثم يورك، وآخرين. وقامت جامعة أريزونا بتنظيم سلسلة محاضرات تحت عنوان "النظام فى الهيولية"، وجاء هارى سوينى، وتحدث عن تجاربه، وحين رأى شافر شرائح لرسومات للجاذبات الغريبة، وصوت سوينى يقول: "إنها بيانات حقيقية"، شعر بالقشعريرة تسرى فى بدنه.

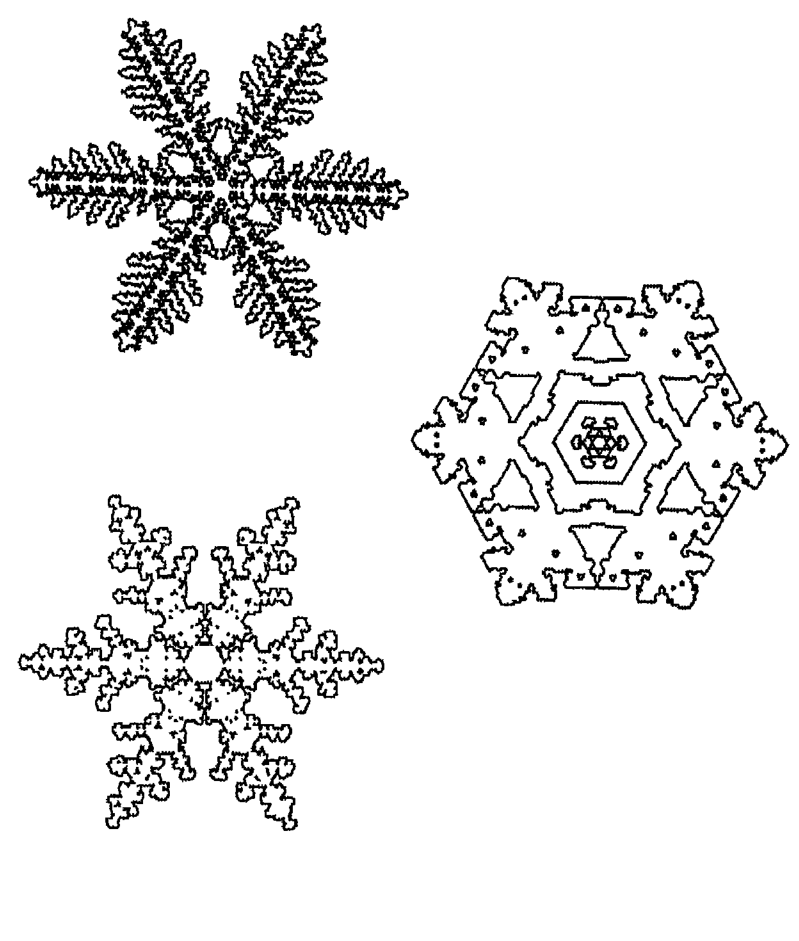
يقول شافر: "أحسست فجأة أن هذا الطريق أصبح قدرى." والتحق على الفور بعام دراسىّ.

هناك فى أعالى الجبال، كان يعلم أن النمل يتغير مع الفصول، وأن النحل يتدافع فى أزيز ديناميكى، وأن السحب تغطى صفحة السماء، وأنه لم يكن قادراً على الاستمرار فى العمل بالأسلوب القديم.



شكل ١١-١ التفرع والتجمع: إن دراسة أنماط الحركة، والتى تعززها رياضيات الهيولية، تربط بين الصور الطبيعية المختلفة، كربط مسار الشحنات الكهربية فى حالات البرق والصواعق بالتجمعات العشوائية للجسيمات المتحركة (الصورة الصغرى).







شكل ١١-٢ التوازن بين الاستقرار وعدم الاستقرار. بينما يتبلور السائل، تظهر فيه بروزات نامية ذات حواف تصبح غير مستقرة، فترسل تفرّعات جانبية (مبينة فى صورة اليسرى متعددة اللقطات). تظهر المحاكيات الحاسوبية لعمليات الديناميكا الحرارية الدقيقة محاكاة لتكون الكسف الثلجية (الصور فى الشكل الأيمن).

يبين هذا النقد بجلاء فساد المقابل العربى الذى يحمل معنى الفوضى، ومدى التوفيق بالنسبة للمصطلح العربى الذى اخترناه، فهو لا يحمل بالنسبة للقارئ العربى هذا المعنى الخاطئ. فمصطلح الهيولية فى التراث يعنى المادة الأولى التى قيل بأن منها صُنع الكون، ومن جهة أخرى فهو بهذا المعنى قريب من مفهومة العلمى الجديد كطريقة لتكون الأنظمة والأشكال فى الطبيعة، وما التوفيق إلا من عند الله– المترجم.



قاموس عربى- لاتينى

استقرار Stability: يوصف النظام بأنه مستقر stable إذا صمد أمام المؤثرات، بحيث يعود إلى وضعه الأصلى حين تزول تلك المؤثرات، وتكون حالة الاستقرار على أربع صور: (١) حالة ثابتة steady state، (٢) حالة دورية perdiodic (ظ) (٣) حالة شبه دورية (ظ)، حالة هيولية (ظ).

إعادة الاستنتظام renormalisation عملية رياضية لتهذيب المعادلات الرياضية بحيث تُنقّى من نقاط عدم الاتصال واللانهايات، متّبعة أساساً فى دراسات تفاعلات الجسيمات الأولية فى الفيزياء، اقتبسه فايجنباوم للتطبيق فى دراسات الهيولية.

بُعد كسرى(*) fractional dimention: تتميز الأشكال الهندسية المعتادة بأنه لها أبعاد بعدد صحيح: الخط المستقيم ١، الشكل المسطح ٢، شكل الفراغى ٣، الزمكان فى النظرية النسبية ٤، (ومن الممكن تصور أشكال ذات أبعاد أكثر.) ولكن الشكل الفراكتلى (ظ) تكون له أبعاد كسرية معبّرة عما به من عدم انتظام. ويفسر ثبات البعد الكسرى للشكل الفراكتلى (ظ) تمتعه بظاهرة التماثل الذاتى (ظ) أو المقياسية (ظ).

تباعد divergance: متسلسلة رقمية تتزايد أرقامها إلى مالا نهاية.

تثبيت النسق mode locking: ضبط تردد ذبذبة عن طريق ذبذبة أخرى.

تشعب (ثنائى)(*): ظ تفرع ثنائى.

تغذية خلفية feedback: تأثير المخرجات على المدخلات، من العوامل المؤدية إلى نشأة الظواهر الهيولية (مثال الاحتكاك حين يؤثر فى السرعة التى تؤثر بدورها على الاحتكاك.) وهى على نوعين، إيجابية وسلبية. فى الأولى يكون تأثير المخرجات على المدخلات تعزيزاً، وفى الثانية يكون التأثير إخماداً. الإيجابية هى التى تؤدى إلى لاخطيّة العلاقات، ومن ثم العشوائية، بينما السلبية تؤدى إلى استقرار النظم.

تفرُّع ثنائي(*) befurcation: ظاهرة تتكرر دورياً بين قيمتين أربع قيم ثم ثمانية، وهكذا إلى أن تختلط الدورات فتبدو عشوائية، ولكنها في الواقع تكون قد دخلت في طور الهيولية. التفرع الثنائي أحد طرق الدخول في الهيولية بالإضافة إلى شبه الدورية (ظ) والتقطع (ظ).

تقارب convergence: الخصيصة الجوهرية للأشكال الفراكتلية، تعني أن الشكل الفراكتلي يتكون من أشكال متماثلة تتصاغر باستمرار إلى مالا نهاية، وهو مصطلح يعتبر مرادفا لمصطلح المقياسية. السبب في هذا التماثل هو ثبات البُعد الكسرى (ظ) للشكل.

جاذب attractor: منحنى يمثل النظم المستقرة في فضاء الطور (ظ) الذي إما لولب ينتهي إلى نقطة (حالة ثبات) أو إلى شكل مقفل (ظاهرة ترددية)، أو إلى شكل مقَفل معقّد (حالة شبه الدورية، يأخذ المنحنى شكل طارة torus) أو حالة هيولية (جاذب عجيب أو غريب).

جاذب عجيب (ظ: جاذب غريب).

جاذب غريب strange attractor: جاذب (ظ) يمثل حالة الهيولية، يظل متغيرا بلا نهاية بحيث لا يتقاطع مع نفسه أبداً (لا تتكرر حالة من حالاته.)، فالمسارات تتقارب وتتباعد بلا انقطاع، ولكن لا تتشتت نقاطها عشوائياً، بل تظل في حيز محدد. يعتبر هندسيا شكل فراكتلي (ظ). يعتبر لورنز أول من رسم مثل هذا الجاذب، وقد رسمه لبيان فضاء الطور (ظ) لتيارات الحمل. ظهر هذا الاصطلاح لأول مرة في بحث بعنوان "حول طبيعة الاضطراب" وضعه رويل وتاكينز، ويدور نزاع (ودي) بينهما على من له شرف وضعه.

حدوة سمول small hioseahoe: التصوير الطوبولوچي (ظ) للجاذب الغريب (ظ)، حيث يصور ما يحدث من تقارب بين في مساراته بانكماش في فضاء الطور (ظ) وما يحدث من تباعد بمطٍ لفضاء الطور، إلى أن يأخذ فضاء الطور شكل حدوة الحصان.

خريطة الإعادة return map ظ: خريطة بوانكرية.

خريطة بوانكريه Poincre map: أسلوب رياضي لتحليل الجاذبات (ظ) في فضاء الطور (ظ) للتصرفات المعقدة التي تتضمن أكثر من ثلاثة عوامل، الأمر الذي يستحيل معه رسمها، حيث يكون لفضاء الطور أكثر من ثلاثة أبعاد.

يعتمد الأسلوب على أنه بدلا من رسم الجاذبات تفصيلياً، الاكتفاء برسم تقاطعاتها مع مستوى معين، يوضع إما فى أكثر المواضع أهمية، أو على فترات زمنية متساوية.

دورى periodic: نظام يتكرر على دورات منتظمة، مثال: حركة البندول. تتميز النُّظم الهيولية بأنها لا دورية (ظ).

رقم ليابونوف(*) Lyapunov exponent: هذا الرقم يعطى وسيلة لبيان الخصائص الطبولوچية المتعلقة بمفاهيم مثل عدم القابلية للتنبؤ. هذه الأرقام فى أى نظام تعطى طريقة لقياس التأثيرات المتعارضة للمط والانكماش والطى فى فضاء الطور للجاذب. إنها تعطى صورة لكافة الخصائص المؤدية إلى الاستقرار أو عدم الاستقرار. فالرقم أكبر من الصفر يعنى المط، حيث تتباعد النقاط القريبة، الأقل من الصفر يعنى الانكماش. ولجاذب ذو نقطة محددة، يكون للجاذب رقما سالبا، حيث يكون التجاذب إلى الداخل، تجاه نقطة الاستقرار. والجاذب الذى ينتهى إلى حركة متذبذبة يكون ذو رقم يساوى الصفر بالضبط، ورقم آخر سالب. أما الجاذب الغريب، فقد اكتشف أن له رقما موجباً.

شبه دورى quaiperiodic: نظام يتأرجح بين دورتين ترددهما ليس متناسباً كأعداد صحيحة، يمثل فضاء الطور للظاهرة شبه الدورية فى شكل طارة torus، وشبه الدورية هى أحد طرق الدخول فى الهيولية بالإضافة للتفرّع الثنائى والتقطع.

طوبولوجيا topology: أحد فروع الرياضيات، يدرس ما يجرى على الأسطح من التواءات ومط وانكماش وسطى، وغير ذلك من تغيرات، وتأثير ذلك على الأشكال المرسومة عليها. هذه هى الطريقة الرياضة التجريدية لرسم الجاذبات الغريبة. فالمطّ مثلا يقابل زيادة الطاقة فى النظام، بينما الانكماش يعنى تشتتها منه، وهكذا.

فئة كانتور Cantor set: فئة وضعها الرياضى كانتور تنتج من محو ثلث مستقيم من منتصفه، ثم تكرار ذلك على ما يتبقى من مستقيمات، وهكذا: تعتبر أحد الوسائل لتحوُّل النظم للهيولية، وقد علل بها ماندلبروتت الشوشرة التى تظهر فى بعض خطوط الاتصالات.

فراكتال(*) fractal: شكل هندسى يتكون من تكرار نسق معين على مستويات أقل وأقل إلى ملايين المرات، فيبدو للعين المجردة عشوائياً. وهو يتميّز بأنه كسرى الأبعاد. وقد تبين أن الجاذبات الغريبة (ظ) يعبر عنها بمنحنيات فراكتلية، فهى دائمة التغير، ولكن لا تتقاطع مع نفسها.

فضاء الطور[*] phase space: شكل بيانى متعدد الأبعاد، يبيّن العلاقة بين المتغيّرات الخاصة بظاهرة ما.

لا دورى aperiodic: نظام دائم التغير، ولكن ليس فى دورات منتظمة، مثال، الطقس. كافة النظم الهيولية تتسم بهذه الخصيصة (قا: دورى).

مائع fluid: اسم جامع يطلق على المواد وهى فى حالة السيولة أو الحالة الغازية.

محاكاة simulation: نموذج رياضى (ظ: نمذجة رياضية)، قد يمثّل برنامج حاسوبى، يحاكى ظاهرة ما، مثال: الطقس، التكاثر البيئى لكائن ما.

محاكى simulator: جهاز يعمل لتمثيل تصرُّف ظاهرة ما، يتحكم فيه نموذج لمحاكاة (ظ) الظاهرة. تستخدم المحاكيات للأبحاث، وكذلك للتدريب (قيادة السيارات أو الطائرات أو التدريبات العسكرية...الخ).

المعاودة[*] recursion: تكرار عملية معينة، بحيث يستخدم خارج كل خطوة كمدخل للخطوة التالية.

مقياسية[*] scaling: ظاهرة أو عملية تتكرر بنفس النمط على مقاييس متدرجة فى الصغر أو فى الكبر، وهى أساس الأشكال الفراكتلية. فالظاهرة المقاسية phenomena scaling كالسحب والزلازل لا يتغير عدم انتظامها، معبر عنه بالبّعد الكسرى، بالمرة حين يتغير مقياس النظر إليها.

نظام تشتتى dissipative system: نظام تتشتت الطاقة فيه (بسبب الاحتكاك مثلا)، فى حالة عدم تعويض الطاقة تنتهى النظم إلى السكون، أما عند تعويضها فيمكن أن تصل لحالة استقرار (ظ).

نظام محافظ conservative: نظام محافظ على الطاقة (مثل البندول الذى يستخدم فى الساعات)، يمكن أن يدخل فى حالة الهيولية، ولكن لا يتميز فضاء الطور (ظ) له بجاذب غريب. (قا: نظام تشتتى).

نمذجة رياضية mathematical modelling: وضع مجموعة من معادلات رياضية تصف تصرّف ظاهرة ما.

هيولية[*] chaotic state: حالة عشوائية ظاهرياً، ولكنها فى الواقع تتضمن انتظاماً، ويتحول النظام إليها بطريق من الطرق الثلاثة الآتية: التفرع الثنائى (ظ) أو شبه الدورية (ظ) أو التقطّع (ظ). يعبر عن حالة الهيولية للنظم التشتتية (ظ) بجاذب غريب (ظ).



قاموس لاتيني - عربي

aperiodic	لا دورى
bifurcation	تفرُّع (تشعب) ثنائى(*)
attractor	جاذب(*)
chaotic state	حالة هيولية(*)
convergence	تقارب
divergance	تباعد
fractal	فراكتال
fractional dimention	بُعد كسرى
Lyapunov exponent	رقم ليابونوف(*)
mathematical modelling	نمذجة رياضية
pattern	نمط، نسق
periodic	دورى
phase space	فضاء الطور
scaling	مقياسية(*)
simulation	محاكة
simulator	محاكى
strange attractor	جاذب غريب(*)

logistic map ———————————— خريطة لوجستية

logistic difference wquation ———— معادلة الفروق اللوجستية

recursion ———————————————— المعاودة

Mandelbrot set ——————————— فئة ماندلبروت

Hausdorff dimension ——————— بعد هاوسدورف

mode locking ——————————— تثبيت النسق

entropy ————————————— إنتروبيا

quasiperiodic ——————————— شبه دورى

ملحق
ج

أهم الشخصيات الواردة فى الكتاب

Kolmogorov A.N. أ.ن كولوجوروف: وضع مع سيناى رياضيات بارعة عن طريقة تطبيق "معدّل الإنتروبيا بالنسبة للزمن" على الصور الهندسية للأسطح التى تطوى وتُمطّ لفضاء الطور. والفكرة الجوهرية هى وضع مُربّع صغير حول مجموعة من الظروف الأولية، كما لو قمنا بوضع مربع صغير على سطح بالون، ثم يحسب تأثير ما يجرى على المربع من التواءات وتمدد. فهو قد يتمدد فى اتجاه واحد، بينما يظل ضيقاً فى اتجاه آخر، ويقابل التغير فى المساحة دخول لعنصر اللاتأكد فى ماضى النظام، أى اكتساب أو فقد للمعلومات.

Abrabam, Ralph رالف إبراهام: استاذ رياضيات، صاحب سميل وشجع شو، قام بدراسة البيئة من خلال فرض الجايا، ووضع نموذج مكون من ثلاثة ألوان لدراسة التوازن البيئى.

Ahlers, Günter جينتر آلرس: تجريبى من شركة AT&T قام بتجاوب فى موضوع التحوّل السائلى الفائق.

Barnsley Michael ميشيل برانسلى: ترجمة معادلات فايجنباوم إلى الأرقام المركبة، إنشاء الأشكال الفراكتلية عن طريق تكرار قوانين بسيطة عدداً كبيراً من المرات، وهو ما أسماه "اللعبة الهيولية"، واكتشاف الطريقة لاستنباط القوانين للقيام بذلك لشكل معين (نظرية الملصقات collage theorem). احتمال أن تكون الطبيعة تنهج نفس المنهج فى إنتاج أشكالها الفراكتلية، وهو الأعم من أشكالها، مثلا: أوراق الشجر.

Burke. William ويليام بروك: استاذ شو، له أبحاث فى موجات الجاذبية، أعطاه معادلات لورنز لدراستها، فوجه نظره للتفرغ للنظم الديناميكية.

Cantor, George جورج كانتور: عالم رياضى من علماء القرن التاسع عشر، وضع فئة معروفة باسمه، استخدمها ماندلبروت كأساس لظاهرة المقياسية.

Cruchfield, Jamesجيمس كرتشفيلد: العضو الرابع فى جماعة النظم الديناميكية.

Douady, Adrien أدريان دودى: رياضى فرنسى، مع هبارد فى دراسة فئة ماندلبروتت.

Farmer, Doyne دوين فارمر: العضو الثانى فى الجماعة

Fatou, Pierre بيير فاتو: اشترك مع جوليا فى وضع فئة جوليا.

Feigenbaum, Mitchell متشل فايجنباوم: رياضىٌ له الفضل فى اكتشاف ظاهرة العمومية، إذ اكتشف أن تقارب الظواهر الهيولية يتم بنسبة واحدة، كما اكتشف متواليات لتفرعات النظم الهيولية عرفت باسمه، ولها علاقة بأشكال فئة ماندلبروت.

Fisher, Michael ميشيل فيشر: باحث فى التحوّل الطورى

Ford, Joseph جوزيف فورد: أحد منصارى الهيولية من معهد جورجيا التكنولوچى. كان يرى أنه فى دراسة اللاخطية يكمن مستقبل الفيزياء بأسره، ونصّب من نفسه مناراً لكل من أراد أن يبحر فى هذا الاتجاه، من خلال المقالات العلمية. كانت خلفيته فى الهيولية غير التشتتية non-dissipative chaos، فى مجالى الفلك وفيزياء الجسيمات الأولية. كان على دراية طيبة بمجهودات العلماء السوفيت فى هذا المجال، كما جعل من أهدافه إقامة الصلة بين كافة من ينتهجون هذا فورد. أقام مع جويليو كازاتى أول مؤتمر عن الهيولية عام ١٩٧٧.

Giullion Casati جويليو كازاتى: أقام مع جوزيف فورد أول مؤتمر عن الهيولية عام ١٩٧٧.

Glass, Leon ليون جلاس: من جامعة مكجل McGill فى منتريال بكندا كان متخصصاً فى الفيزياء والكيمياء، حيث أدى شغفا بالأرقام وباختلال النظم، وأتمّ رسالة الدكتوراة فى موضوع الحركة الذرية داخل السوائل قبل أن يتجه لأبحاث اضطرابات القلب، تجربة عيّنات من أجنة الدجاج.

Goldberger, Ary آرى جولدبرجر: كلية الطب بجامعة هارفادر

Goldberger, Ary آرى جولدبرجر: مساعد مدير مركز أبحاث اضطرابات القلب فى مستشفى بث إسرائيل، اقترح أن يكون النظام الديناميكى السليم مميّزاً بهيكل فراكتلى، بحيث يتيح العمل عند مدى واسع من الإيقاعات، على أساس أن العمليات الفراكتلية المصحوبة بطيف واسع من تعدد المقاييس هو غنى بالمعلومات. بينما الحالات

الترددية فى المقابل تعكس طيفاً ضيقاً ومحددة بتكرارات مقبضة، عارية عن المعلومات، وقد اقترح مع بعض الباحثين أن معالجة هذه الاضطرابات قد يعتمد توسيع مجال النظام، أى قابليته العمل على مدى واسع من الترددات دون الوقوع فى قبضة تثبيت النسق.

Gollub, Jerry جيرى جولب: تعاون مع سوينى فى دراسات تحول الطور.

Hénon, Michel ميشيل هينون: فلكى من مرصد نيس رسم الجاذبات الغريبة لنظم فلكية، مستخدما نظام التطبيق (mapping) لإجراء عمليات الطى والمط المطلوبة لرسم هذه الجاذبات طبولوجيا.

Hoppensteadt, Frank فرانك هوبنستد: عالم رياضى شغف بالبيولوچيا، درس المعادلة اللوجستية.

Hubbard, John، جون هبارد: تحليل طريقة نيوتن فى التقريب، تطبيق نظرية التدفّق فى النظم الديناميكية عليها، اكتشاف التداخل عند الحدود. لقد شعر أن وضع خرائط لطريقة نيوتن ليست إلا واحدة من عائلة لم تُكتشف بعد من الصور التى تعكس تصرّف القوى فى العالم الواقعى. وكان ميشيل برانسلى يبحث عن عناصر أخرى من العائلة. أما بنوا ماندلبروتت، كما علم فيما بعد، فقد كان يبحث فى الجد الأعلى لهذه العائلة (فئة ماندلبروت). استخدم لأول مرة أسلوب تحليل الأعداد المركبة على النظم الديناميكية. عمل دراسات عن فئة ماندلبروت "وقد استخدم دودى وهبادر سلسلة بارعة من الرياضيات الحديثة لإثبات أن كل جزيئية متطايرة لها ارتباط بأصلها. كما أثبتا أنه ما من جزء متطاير إلا ويترك آخر مكانه، شبيه له، ولكن ليس فى تطابق تام، وأن كل جزء جديد ينشأ محاطاً بخطوط اتصاله المتشعبة، تحمل فى نهاياتها براعم الأشكال الجديدة. يالها من معجزة فى عالم التصغير اللامتناهى!".

Huberman, Bernardo برناردو هبرمان: مركز زيوبكس للأبحاث، أبحاث فى الشيزوفرانيا.

Huygens, Christian كرستيان هايجنز: لعالم فيزيائى هولندى، اخترع البندول فى القرن السابع عشر وكذا علم الديناميكا الكلاسيكى، توصّل إلى أثر التغذية الخلفية السلبية فى ثبات النظم الديناميكية، حين لاحظ ذات يوم أن مجموعة من البندولات تتحرك فى تزامن تام، واتضح أن السبب هو انتقال الذبذبات خلال الحائط الخشبى (ظاهرة تثبيت النسق mode locking).

Ideker, Raymond E. ريموند آيدكر: من كلية طب جامعة ديوك Duke، أبحاث القلب. تصميم جهاز لمواجه الارتجاف البطيني.

Julia, Gaston جاستون جوليا: رياضي واضع فئة جوليا، التى اتخذها ماندلبروت أساساً لوضع الفئة المعروفة باسمه

Kadanoff, Leo ليو كادانوف: باحث فى التحول الطورى فى مجال التمغنط. تصوّر المقياسية أثناء هذا التحول. تصور العمومية فى هذه العمليات، بمعنى أن قواعدها تسرى على كل عمليات التحول الطورى مهما كان مجالها.

Kohen, Richard ريتشارد كوهين: طبيب القلب والفيزيائى وجد فى برنامج مشترك بين هارفارد إم.أى.تى. مدى واسعا من تسلسلات تضاعف الفترات فى الكلاب.

Landqu, Lev ليف لاندو: عالم سوفيتى وضع معادلات تبين سير الاضطرابات فى السوائل، كشف التحليل الهيولى عن خطئها.

Lanford, Oscar III أوسكار لانفورد الثالث: رياضىٌ أثبت ظاهرة العمومية رياضيا عام ١٩٧٩.

Libchaber, Albert ألبرت ليبشابر: بولندى يهودى، أجرى تجارب رائدة فى تيارات الحمل للهليوم السائل.

Lorenz, Edward إدوارد لورنز: رياضى، باحث فى الطبيعة الجوية بمعهد M.I.T، الأب الروحى لدراسات الهيولية، بدأ دراساته فى الستينات. وضع نماذج حاسوبية لنمذجة الطقس وتيارات الحمل وديناميكية الموائع بشكل عام. أطلق على ظاهرة الحساسية للظروف الأولية تعبير: "تأثير الفراشة"، مكتشف "جاذب لورنز" الذى يعتبر حجر الزاوية فى كافة الدراسات التالية. ملحوظة: لا يجب الخلط بينه وبين عالم الفيزياء الشهير فى بداية هذا القرن، هندريك لورنز الحائز على جائزة نوبل عام ١٩٠٢، والمتوفى عام ١٩٢٨.

Mandelbrot, Benoit بنوا ماندلبروت: رياضى فرنسى مؤسس الهندسة المطبقة فى التحليل الهيولى. وضع الكثير من المفاهيم المتعلقة بالهيولية: منها: أشكال الفراكتال، المقياسية، الأبعاد الكسيرة، (وأثبت أنها ثابتة لأى شكل غير هندسى، مهما بلغت درجة عدم استوائه، ووضع الأسلوب الرياضى لإيجاد البعد الكسرى للأشكال غير المستوية.)، التماثل الذاتى، طبق التحليل الهيولى على العديد من المجالات العلمية المختلفة، منها الاقتصاد، الاتصالات، وعلم النفس. واضع "فئة

ماندلبروت Mandelbrot set"(٨) كواحدة من أهم الفئات الرياضية وأعقدها على الإطلاق، اكتشاف أن التماثل الذاتى للأشكال الفراكتلية ليس تطابقاً تاماً فى هذه الفئة (را: دراسات هبارد عن الحدود ومحاولته فهم فئة ماندلبروت).

Mandell, Arnold أرنولد ماندل: طبيب وعالم فى النظم الديناميكية، تحوّل إلى دراسة الهيولية عام ١٩٧٧، حين وجد "تصرّفات غريبة" فى بعض أنزيمات المخ لا يمكن تبريرها إلا عن طريق نوع حديث من رياضيات اللاخطية. شجّع على دراسة البروتينات كنظم ديناميكية، بدلاً من الاكتفاء بدراسته أشكالها الاستاتيكية.

Marcus, Phillip فيليب ماركوس: فلكى، جامعة كورنل. دراسة صور فوياجير للبقعة الحمراء للمشترى. أثبت أن الظاهرة هى تطبيق لحالة الهيولية على النظم الديناميكية، ولذا فقد اعتبر نفسه عالما فى الهيولية وليس فى الفلك أو الرياضيات.

May, Robert روبرت ماى: عالم استرالى كان فى البداية فيزيائيا ثم تحول للدراسات البولوچية، اكتشف التفرّع الثنائى.

Mines, George جورج مينز: جامعة ماكجل بمونتريال، تمكن مينز فى من صناعة جهاز صغير عال الدقة لإنتاج نبضات كهربية القلب. طبقة على نفسه.

Packad, Norman نورمان باكار: العضو الثالث من جماعة النظم الديناميكية.

eitgen, Heinz-Otto هاينز-أوتو بايتجن: بحث فى التغيّر تطورى فى مغنطة المعادن، أقام معرضا للأشكال الفراكتلية.

Poincaré, Henri هنرى بوانكريه: عالم فيزيائى شهير عاش فى نهاية القرن الماضى وبداية القرن العشرين، رأى فى علم الطبولوچيا والنظم الخطية وجهان لعملة واحدة. يُعتبر أول من تنبأ بالهيولية، ووصل إلى اكتشافات قريبة من لورنز.

Ritchardson, Lewis لويس ريتشاردسون: عالم من بداية القرن بحث فى بعض الموضوعات المتعلقة بالهيولية، منها دراسة الشواطئ والتنبؤ الجوى، ألهم ماندلبروت فى أبحاثه.

Ruelle, David دافيد رويل: عالم بلچيكى عمل مع سوينى. واضع مفهوم "الجاذب الغريب" مع تاكينز، ووضع نموذجا لعمل القلب.

Schaffer, M. شافر: عالم بيئى، بين أن انتشار الأوبئة يخضع لجاذب غريب بُعده الكسرى حوالى ٢,٥، كما حسب بقية الخصائص، كرقم ليابانوف ورسم خرائط

بوانكريه، مما ساعد على مواجهتها. اتجه للهيولية بعد أن ثبت لديه فشل نموذجه عن تكاثر الحشرات.

Scholtz, Christopher كرستوفر شولتز: عالم طبَّق مفاهيم ماندلبروت على دراسة الزلازل.

Schwenk, Theodor تيودور شفنك: واضع كتاب "الفوضوية الحساسة"، تابع فيه ملامح تدفّقات المياه فى الأنهار.

Shannon, Claude كلود شانون: واضع نظرية المعلومات

Show, Robert روبرت ستيتسون شو: العضو الأول فى جَماعة النظم الديناماكية ومؤسسها، ربط الهيولية بنظرية المعلومات، فنظر للجاذب الغريب علي أنه مولّد للمعلومات عن النظام. وضع نظاما لاستخلاص الجاذب الغريب من مجموعة البيانات فقط (عن طريق المياه المتساقطة من صنبور)، دون حاجة لمعرفة النظام فيزيائياً.

inai, Yasha ياشا سيناى: اشترك مع كولموجوروف فى وضع رياضيات حول معدّل الإنتروبيا مع الزمن.

Smale, Stephen ستيفان سمول: رياضى، جامعة كاليفورنيا. أوّل من قام بدراسة منهجية لتصرّف النظم الديناميكية على أساس شامل وليس تجزيئى. خليفة بوانكريه فى تطبيق الطبولوجيا على النظم الديناميكية. واضع الشكل المسمى "حدوة سمول Small's horseshoe" لتمثيل تغيرات النُّظم الديناميكية طبولوجياً.

Swinney, Harry هارى سوينى: عالم تجريبى عمل فى مجال تغيرّ الحالات، أو تحول الطور. اكتشف خطأ نظرية لاندو عن الاضطرابات فى المَوائع.

Takens, Floris فلوريس تاكنز: اكتشف الجاذبات الغريبة مع دافيد رول، كل على انفراد. وضع الأساس الرياضى لأسلوب جماعة النظم الديناميكية مع استخلاص الجاذبات الغريبة من تدفق البيانات الواقعية.

Thompson, D'Arcy دارسى تومسون: عالم بيولوچى من أوائل القرن درس البيولوچيا من وجهة نظر الهَيولية.

Ueda, Yoshisuke يوشيسوك أيدا: باحث يابانى وضع عدداً من الجاذبات الغريبة للدوائر الإلكترونية.

Koch von, Halge هالج فون كوخ: عالم رياضى قديم واضع منحنى باسمه، يعتبر شكلاً فراكتليا.

Wilson, Kenneth كينيث ويلسون: حائز على جائزة نوبل عام ٨٢ عن التحوُّل الطورى، طبق عليها قواعد إعادة الاستنظام (كبديل للتعامل التقليدى للنظم الخطية عن طريق تقريبها) وفكة المقياسية.

Winfree, Arthur آرثر وينفرى: عالم بيولوچيا كان له غرام بالهندسة، قام بأبحاث عن الساعة البيولوچية.

York. James جيمس يورك: من جامعة ميريلاند، درس تكاثر الكائنات من الوجهة الهيولية. مقترح مصطلح chaos.

ملحق
د

أهم المفردات الواردة فى الكتاب

أرض، المجال المغناطيس لـ
أرق insomnia
أشكال فاينمان
أعداد تخيلية ظ: أعداد مركبة
أعداد فايجنباوم
أقمار صناعية
ألمانيا
أنهار
أوراق شجر leaves
أوعية دموية
إرادة حرة
إعادة الاستنظام، نظرية
إعصار cyclone
إقليدس
إنتروبيا
إيطاليا
الاتحاد السوفيتى
اتزان equilibrium
احتكاك
ارتجاف بطينى fibrillation
اسفنجة منجر
اضطراب
اقتصاد
انقطاع الاتصال discontinuity

بيولوجيا
/الرياضيات فى
/نمذجة الـ/
النظرية/ ظ: فسيولوچيا
تأثير الفراشة
تجريب
التجزيئية
تحديدية determinism
تحول الطور
تدفق
تدفق Coutte-Tylor
ترابط النسق؟ mode locking
ترانزستور
التزيد redundancy
التشابه الذاتى
تشتت dissipation
تشعبات dendrites
تشفير (تعمية) cryptology
تشويش ظ شوشرة
تصور بوانكريه
تضاعف الفترة
تطور
تغذية خلفية
تفاضل وتكامل ظ: معادلات

تكرارية iteration
تكوكب، تعنقد clustering
تنبؤ
التنظيم الذاتى
توازن
توتر سطحى
توزيع طبيعى
توصيل فائق
تيار الخليج
تيارات الحمل
جاذب أودا Ueda attractor
جاذب روسلر
جاذب غريب
جاذب لورنتز
جاذب هينون
جاذب/المفيض لـbasins of/نو
النقطة الثابتة (الحالة
المستقرة steady state)/المتذبذب
oscillating/اتزان الـ/ظ:جاذب
غريب
الجاذبات الهيولية ظ: جاذبات
غريبة
جاذبية
جايا

نحل
النسبية
النظام الشمسى
النظام المناعى
نظرية التوحيد الكبرى
نظرية المعلومات
نظُم ديناميكية لاخطيَّة
نظم ديناميكية ...
نماذج models
نماذج patterns

المشروع القومى للترجمة

١-	اللغة العليا (طبعة ثانية)	جون كوين	ت : أحمد درويش
٢-	الوثنية والإسلام	ك. مادهو بانيكار	ت : أحمد فؤاد بلبع
٣-	التراث المسروق	جورج جيمس	ت : شوقى جلال
٤-	كيف تتم كتابة السيناريو	انجا كاريتنكوفا	ت : أحمد الحضرى
٥-	ثريا فى غيبوبة	إسماعيل فصيح	ت : محمد علاء الدين منصور
٦-	اتجاهات البحث اللسانى	ميلكا إفيتش	ت : سعد مصلوح / وفاء كامل فايد
٧-	العلوم الإنسانية والفلسفة	لوسيان غولدمان	ت : يوسف الأنطكى
٨-	مشعلو الحرائق	ماكس فريش	ت : مصطفى ماهر
٩-	التغيرات البيئية	أندرو س. جودى	ت : محمود محمد عاشور
١٠-	خطاب الحكاية	جيرار جينيت	ت : محمد معتصم وعبد الجليل الأزدى وعمر حلى
١١-	مختارات	فيسوافا شيمبوريسكا	ت : هناء عبد الفتاح
١٢-	طريق الحرير	ديفيد براونيستون وايرين فرانك	ت : أحمد محمود
١٣-	ديانة الساميين	روبرتسن سميث	ت : عبد الوهاب علوب
١٤-	التحليل النفسى والأدب	جان بيلمان نويل	ت : حسن المودن
١٥-	الحركات الفنية	إدوارد لويس سميث	ت : أشرف رفيق عفيفى
١٦-	أثينة السوداء	مارتن برنال	ت: بإشراف: أحمد عتمان
١٧-	مختارات	فيليب لاركين	ت : محمد مصطفى بدوى
١٨-	الشعر النسائى فى أمريكا اللاتينية	مختارات	ت : طلعت شاهين
١٩-	الأعمال الشعرية الكاملة	چورج سفيريس	ت : نعيم عطية
٢٠-	قصة العلم	ج. ج. كراوثر	ت: يمنى طريف الخولى / بدوى عبد الفتاح
٢١-	خوخة وألف خوخة	صمد بهرنجى	ت : ماجدة العنانى
٢٢-	مذكرات رحالة عن المصريين	جون أنتيس	ت : سيد أحمد على الناصرى
٢٣-	تجلى الجميل	هانز جيورج جادامر	ت : سعيد توفيق
٢٤-	ظلال المستقبل	باتريك بارندر	ت : بكر عباس
٢٥-	مثنوى	مولانا جلال الدين الرومى	ت : إبراهيم الدسوقى شتا
٢٦-	دين مصر العام	محمد حسين هيكل	ت : أحمد محمد حسين هيكل
٢٧-	التنوع البشرى الخلاق	مقالات	ت : نخبة
٢٨-	رسالة فى التسامح	جون لوك	ت : منى أبو سنه
٢٩-	الموت والوجود	جيمس ب. كارس	ت : بدر الديب
٣٠-	الوثنية والإسلام (ط٢)	ك. مادهو بانيكار	ت : أحمد فؤاد بلبع
٣١-	مصادر دراسة التاريخ الإسلامى	جان سوفاجيه - كلود كاين	ت : عبد الستار الحلوجى / عبد الوهاب علوب
٣٢-	الانقراض	ديفيد روس	ت : مصطفى إبراهيم فهمى
٣٣-	التاريخ الاقتصادى لإفريقيا الغربية	أ. ج. هوبكنز	ت : أحمد فؤاد بلبع
٣٤-	الرواية العربية	روجر آلن	ت : حصة إبراهيم المنيف
٣٥-	الأسطورة والحداثة	پول . ب . ديكسون	ت : خليل كلفت

٣٦- نظريات السرد الحديثة	والاس مارتن	ت : حياة جاسم محمد
٣٧- واحة سيوة وموسيقاها	بريجيت شيفر	ت : جمال عبد الرحيم
٣٨- نقد الحداثة	آلن تورين	ت : أنور مغيث
٣٩- الإغريق والحسد	بيتر والكوت	ت : منيرة كروان
٤٠- قصائد حب	آن سكستون	ت : محمد عيد إبراهيم
٤١- ما بعد المركزية الأوربية	بيتر جران	ت : عاطف أحمد / إبراهيم فتحى / محمود ماجد
٤٢- عالم ماك	بنجامين باربر	ت : أحمد محمود
٤٣- اللهب المزدوج	أوكتافيو باث	ت : المهدى أخريف
٤٤- بعد عدة أصياف	ألدوس هكسلى	ت : مارلين تادرس
٤٥- التراث المغدور	روبرت ج دنيا - جون ف أ فاين	ت : أحمد محمود
٤٦- عشرون قصيدة حب	بابلو نيرودا	ت : محمود السيد على
٤٧- تاريخ النقد الأدبى الحديث (١)	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٤٨- حضارة مصر الفرعونية	فرانسوا دوما	ت : ماهر جويجاتى
٤٩- الإسلام فى البلقان	هـ . ت . نوريس	ت : عبد الوهاب علوب
٥٠- ألف ليلة وليلة أو القول الأسير	جمال الدين بن الشيخ	ت : محمد برادة وعثمانى الميلود ويوسف الأنطكى
٥١- مسار الرواية الإسبانو أمريكية	داريو بيانويبا وخ. م بينياليستى	ت : محمد أبو العطا
٥٢- العلاج النفسى التدعيمى	بيتر . ن . نوفاليس وستيفن . ج . روجسيفيتز وروجر بيل	ت : لطفى فطيم وعادل دمرداش
٥٣- الدراما والتعليم	أ . ف . ألنجتون	ت : مرسى سعد الدين
٥٤- المفهوم الإغريقى للمسرح	ج . مايكل والتون	ت : محسن مصيلحى
٥٥- ما وراء العلم	چون بولكنجهوم	ت : على يوسف على
٥٦- الأعمال الشعرية الكاملة (١)	فديريكو غرسية لوركا	ت : محمود على مكى
٥٧- الأعمال الشعرية الكاملة (٢)	فديريكو غرسية لوركا	ت : محمود السيد ، ماهر البطوطى
٥٨- مسرحيتان	فديريكو غرسية لوركا	ت : محمد أبو العطا
٥٩- المحبرة	كارلوس مونييث	ت : السيد السيد سهيم
٦٠- التصميم والشكل	جوهانز ايتين	ت : صبرى محمد عبد الغنى
٦١- موسوعة علم الإنسان	شارلوت سيمور - سميث	مراجعة وإشراف : محمد الجوهرى
٦٢- لذّة النّص	رولان بارت	ت : محمد خير البقاعى .
٦٣- تاريخ النقد الأدبى الحديث (٢)	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٦٤- برتراند راسل (سيرة حياة)	آلان وود	ت : رمسيس عوض .
٦٥- فى مدح الكسل ومقالات أخرى	برتراند راسل	ت : رمسيس عوض .
٦٦- خمس مسرحيات أندلسية	أنطونيو جالا	ت : عبد اللطيف عبد الحليم
٦٧- مختارات	فرناندو بيسوا	ت : المهدى أخريف
٦٨- نتاشا العجوز وقصص أخرى	فالنتين راسبوتين	ت : أشرف الصباغ
٦٩- العالم الإسلامى فى أوائل القرن العشرين	عبد الرشيد إبراهيم	ت : أحمد فؤاد متولى وهويدا محمد فهمى
٧٠- ثقافة وحضارة أمريكا اللاتينية	أوخينيو تشانج رودريجت	ت : عبد الحميد غلاب وأحمد حشاد
٧١- السيدة لا تصلح إلا للرمى	داريو فو	ت : حسين محمود

٧٢- السياسى العجوز	ت . س . إليوت	ت : فؤاد مجلى
٧٣- نقد استجابة القارئ	چين . ب . توميكنز	ت : حسن ناظم وعلى حاكم
٧٤- صلاح الدين والمماليك فى مصر	ل . ا . سيمينوڤا	ت : حسن بيومى
٧٥- فن التراجم والسير الذاتية	أندريه موروا	ت : أحمد درويش
٧٦- چاك لاكان وإغواء التحليل النفسى	مجموعة من الكتاب	ت : عبد المقصود عبد الكريم
٧٧- تاريخ النقد الأدبى الحديث ج ٣	رينيه ويليك	ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
٧٨- العولمة : النظرية الاجتماعية والثقافة الكونية	رونالد روبرتسون	ت : أحمد محمود ونورا أمين
٧٩- شعرية التأليف	بوريس أوسبنسكى	ت : سعيد الغانمى وناصر حلاوى
٨٠- بوشكين عند «نافورة الدموع»	ألكسندر بوشكين	ت : مكارم الغمرى
٨١- الجماعات المتخيلة	بندكت أندرسن	ت : محمد طارق الشرقاوى
٨٢- مسرح ميجيل	ميجيل دى أونامونو	ت : محمود السيد على
٨٣- مختارات	غوتفريد بن	ت . خالد المعالى
٨٤- موسوعة الأدب والنقد	مجموعة من الكتاب	ت : عبد الحميد شيحة
٨٥- منصور الحلاج (مسرحية)	صلاح زكى أقطاى	ت : عبد الرازق بركات
٨٦- طول الليل	جمال مير صادقى	ت : أحمد فتحى يوسف شتا
٨٧- نون والقلم	جلال آل أحمد	ت : ماجدة العنانى
٨٨- الابتلاء بالتغرب	جلال آل أحمد	ت : إبراهيم الدسوقى شتا
٨٩- الطريق الثالث	أنتونى جيدنز	ت : أحمد زايد ومحمد محيى الدين
٩٠- وسم السيف	ميجل دى ثرباتس	ت : محمد إبراهيم مبروك
٩١- المسرح والتجريب بين النظرية والتطبيق	باربر الاسوستكا	ت : محمد هناء عبد الفتاح
٩٢- أساليب ومضامين المسرح الإسبانوأمريكى المعاصر	كارلوس ميجل	ت : نادية جمال الدين
٩٣- محدثات العولمة	مايك فيذرستون وسكوت لاش	ت : عبد الوهاب علوب
٩٤- الحب الأول والصحبة	صمويل بيكيت	ت : فوزية العشماوى
٩٥- مختارات من المسرح الإسبانى	أنطونيو بويرو باييخو	ت : سرى محمد محمد عبد اللطيف
٩٦- ثلاث زنبقات ووردة	قصص مختارة	ت : إدوار الخراط
٩٧- هوية فرنسا مج ١	فرنان برودل	ت : بشير السباعى
٩٨- الهم الإنسانى والابتزاز الصهيونى	نماذج ومقالات	ت : أشرف الصباغ
٩٩- تاريخ السينما العالمية	ديڤيد روبنسون	ت : إبراهيم قنديل
١٠٠- مساءلة العولمة	بول هيرست وجراهام تومبسون	ت : إبراهيم فتحى
١٠١- النص الروائى (تقنيات ومناهج)	بيرنار فاليط	ت : رشيد بنحدو
١٠٢- السياسة والتسامح	عبد الكريم الخطيبى	ت : عز الدين الكتانى الإدريسى
١٠٣- قبر ابن عربى يليه آياء	عبد الوهاب المؤدب	ت : محمد بنيس
١٠٤- أوبرا ماهوجنى	برتولت بريشت	ت : عبد الغفار مكاوى
١٠٥- مدخل إلى النص الجامع	چيرارچينيت	ت : عبد العزيز شبيل
١٠٦- الأدب الأندلسى	د. ماريا خيسوس روبييرامتى	ت : د. أشرف على دعدور
١٠٧- صورة الفدائى فى الشعر الأمريكى المعاصر	نخبة	ت : محمد عبد الله الجعيدى

١٠٨- ثلاث دراسات عن الشعر الأندلسي	مجموعة من النقاد	ت : محمود علي مكي
١٠٩- حروب المياه	جون بولوك وعادل درويش	ت : هاشم أحمد محمد
١١٠- النساء في العالم النامي	حسنة بيجوم	ت : منى قطان
١١١- المرأة والجريمة	فرانسيس هيندسون	ت : ريهام حسين إبراهيم
١١٢- الاحتجاج الهادئ	أرلين علوى ماكليود	ت : إكرام يوسف
١١٣- راية التمرد	سادى پلانت	ت : أحمد حسان
١١٤- مسرحيتا حصاد كونجي وسكان المستنقع	وول شوينكا	ت : نسيم مجلي
١١٥- غرفة تخص المرء وحده	فرچينيا وولف	ت : سمية رمضان
١١٦- امرأة مختلفة (درية شفيق)	سينثيا نلسون	ت : نهاد أحمد سالم
١١٧- المرأة والجنوسة في الإسلام	ليلى أحمد	ت : منى إبراهيم ، وهالة كمال
١١٨- النهضة النسائية في مصر	بث بارون	ت : لميس النقاش
١١٩- النساء والأسرة وقوانين الطلاق	أميرة الأزهري سنبل	ت : بإشراف/ رؤوف عباس
١٢٠- الحركة النسائية والتطور في الشرق الأوسط	ليلى أبو لغد	ت : نخبة من المترجمين
١٢١- الدليل الصغير في كتابة المرأة العربية	فاطمة موسى	ت : محمد الجندي ، وإيزابيل كمال
١٢٢- نظام العبودية القديم ونموذج الإنسان	جوزيف فوجت	ت : منيرة كروان
١٢٣- الإمبراطورية العثمانية وعلاقاتها الدولية	نيقل الكسندر وفنادولينا	ت: أنور محمد إبراهيم
١٢٤- الفجر الكاذب	جون جراى	ت : أحمد فؤاد بلبع
١٢٥- التحليل الموسيقى	سيدريك ثورپ ديڤى	ت : سمحه الخولى
١٢٦- فعل القراءة	ڤولڤانج إيسر	ت : عبد الوهاب علوب
١٢٧- إرهاب	صفاء فتحى	ت : بشير السباعى
١٢٨- الأدب المقارن	سوزان باسنيت	ت : أميرة حسن نويرة
١٢٩- الرواية الاسبانية المعاصرة	ماريا دولورس أسيس جاروته	ت : محمد أبو العطا وآخرون
١٣٠- الشرق يصعد ثانية	أندريه جوندر فرانك	ت : شوقى جلال
١٣١- مصر القديمة (التاريخ الاجتماعى)	مجموعة من المؤلفين	ت : لويس بقطر
١٣٢- ثقافة العولمة	مايك فيذرستون	ت : عبد الوهاب علوب
١٣٣- الخوف من المرايا	طارق على	ت : طلعت الشايب
١٣٤- تشريح حضارة	بارى ج. كيمب	ت : أحمد محمود
١٣٥- المختار من نقد ت. س. إليوت	ت. س. إليوت	ت : ماهر شفيق فريد
١٣٦- فلاحو الباشا	كينيث كونو	ت : سحر توفيق
١٣٧- مذكرات ضابط فى الحملة الفرنسية	چوزيف مارى مواريه	ت : كاميليا صبحى
١٣٨- عالم التليفزيون بين الجمال والعنف	إيڤلينا تارونى	ت : وجيه سمعان عبد المسيح
١٣٩- النظرية الشعرية عند إليوت وأدونيس	عاطف فضول	ت : أسامة إسبر
١٤٠- حيث تلتقى الأنهار	هربرت ميسن	ت : أمل الجبورى
١٤١- اثنتا عشرة مسرحية يونانية	مجموعة من المؤلفين	ت : نعيم عطية
١٤٢- الإسكندرية : تاريخ ودليل	أ. م. فورستر	ت : حسن بيومى
١٤٣- قضايا التنظير فى البحث الاجتماعى	ديريك لايدار	ت : عدلى السمرى
١٤٤- صاحبة اللوكاندة	كارلو جولدونى	ت : سلامة محمد سليمان

١٤٥- موت أرتيميو كروث	كارلوس فوينتس	ت : أحمد حسان
١٤٦- الورقة الحمراء	ميجيل دى ليبس	ت : على عبدالرؤوف البمبى
١٤٧- خطبة الإدانة الطويلة	تانكريد دورست	ت : عبدالغفار مكاوى
١٤٨- القصة القصيرة (النظرية والتقنية)	إنريكى أندرسون إمبرت	ت : على إبراهيم على منوفى
١٤٩- النظرية الشعرية عند إليوت وأدونيس	عاطف فضول	ت : أسامة إسبر
١٥٠- التجربة الإغريقية	روبرت ج. ليتمان	ت : منيرة كروان
١٥١- هوية فرنسا مج ٢ ، ج١	فرنان برودل	ت : بشير السباعى
١٥٢- عدالة الهنود وقصص أخرى	نخبة من الكتاب	ت : محمد محمد الخطابى
١٥٣- غرام الفراعنة	فيولين فانويك	ت : فاطمة عبدالله محمود
١٥٤- مدرسة فرانكفورت	فيل سليتر	ت : خليل كلفت
١٥٥- الشعر الأمريكى المعاصر	نخبة من الشعراء	ت : أحمد مرسى
١٥٦- المدارس الجمالية الكبرى	جى أنبال وآلان وأوديت فيرمو	ت : مى التلمسانى
١٥٧- خسرو وشيرين	النظامى الكنوجى	ت : عبدالعزيز بقوش
١٥٨- هوية فرنسا مج ٢ ، ج٢	فرنان برودل	ت : بشير السباعى
١٥٩- الإيديولوجية	ديفيد هوكس	ت: إبراهيم فتحى
١٦٠- آلة الطبيعة	بول إيرليش	ت: حسين بيومى
١٦١- من المسرح الإسبانى	اليخاندرو كاسونا وأنطونيو جالا	ت: زيدان عبدالحليم زيدان
١٦٢- تاريخ الكنيسة	يوحنا الآسيوى	ت: صلاح عبدالعزيز محجوب
١٦٣- موسوعة علم الاجتماع	جوردن مارشال	ت: مجموعة من المترجمين
١٦٤- شامبوليون (حياة من نور)	چان لاكوتير	ت: نبيل سعد
١٦٥- حكايات الثعلب	أ. ن أفانا سيفا	ت: سهير المصادفة
١٦٦- العلاقات بين المتدينين والعلمانيين فى إسرائيل	يشعياهو ليفمان	ت: محمد محمود أبو غدير
١٦٧- فى عالم طاغور	رابندرانات طاغور	ت: شكرى محمد عياد
١٦٨- دراسات فى الأدب والثقافة	مجموعة من المؤلفين	ت: شكرى محمد عياد
١٦٩- إبداعات أدبية	مجموعة من المبدعين	ت: شكرى محمد عياد
١٧٠- الطريق	ميغيل دليبيس	ت: بسام ياسين رشيد
١٧١- وضع حد	فرانك بيجو	ت: هدى حسين
١٧٢- حجر الشمس	مختارات	ت: محمد محمد الخطابى
١٧٣- معنى الجمال	ولتر ت. ستيس	ت:إمام عبد الفتاح إمام
١٧٤- صناعة الثقافة السوداء	ايليس كاشمور	ت: أحمد محمود
١٧٥- التليفزيون فى الحياة اليومية	لورينزو فيلشس	ت: وجيه سمعان عبد المسيح
١٧٦- نحو مفهوم للاقتصاديات البيئية	توم تيتنبرج	ت: جلال البنا
١٧٧- أنطون تشيخوف	هنرى ترويايا	ت: حصة إبراهيم المنيف
١٧٨- مختارات من الشعر اليونانى الحديث	نخبة من الشعراء	ت: محمد حمدى إبراهيم
١٧٩- حكايات أيسوب	أيسوب	ت: إمام عبد الفتاح إمام
١٨٠- قصة جاويد	إسماعيل فصيح	ت: سليم عبد الأمير حمدان
١٨١- النقد الأدبى الأمريكى	فنسنت ب. ليتش	ت: محمد يحيى
١٨٢- العنف والنبوءة	و.ب. ييتس	ت: ياسين طه حافظ
١٨٣- چان كوكتو على شاشة السينما	رينيه چيلسون	ت: فتحى العشرى

١٨٤- القاهرة... حالة لا تنام	هانز إبندورفر	ت: دسوقى سعيد
١٨٥- أسفار العهد القديم	توماس تومسن	ت: عبد الوهاب علوب
١٨٦- معجم مصطلحات هيجل	ميخائيل أنوود	ت:إمام عبد الفتاح إمام
١٨٧- الأرضة	بُزُرْج علوى	ت:علاء منصور
١٨٨- موت الادب	الفين كرنان	ت:بدر الديب
١٨٩- العمى والبصيرة	بول دى مان	ت:سعيد الغانمى
١٨٠- محاورات كونفوشيوس	كونفوشيوس	ت:محسن سيد فرجانى
١٩١- الكلام رأسمال	الحاج أبو بكر إمام	ت: مصطفى حجازى السيد
١٩٢- سياحت نامه إبراهيم بيك جـ١	زين العابدين المراغى	ت:محمود سلامة علاوى
١٩٣- عامل المنجم	بينز أبزاهامز	ت:محمد عبد الواحد محمد
١٩٤- مختارات من النقد الأنجلو-أمريكى	مجموعة من النقاد	ت: ماهر شفيق فريد
١٩٥- شتاء ٨٤	إسماعيل فصيح	ت:محمد علاء الدين منصور
١٩٦- المهلة الأخيرة	فالتين راسبوتين	ت:أشرف الصباغ
١٩٧- الفاروق	شمس العلماء شبلى النعمانى	ت: جلال السعيد الحفناوى
١٩٨- الاتصال الجماهيرى	ادوين إمزى وآخرون	ت:ابراهيم سلامة ابراهيم
١٩٩- تاريخ يهود مصر فى الفترة العثمانية	يعقوب لانداوى	ت: جمال احمد الرفاعى وأحمد عبد اللطيف حماد
٢٠٠- ضحايا التنمية	جيرمى سيبروك	ت: فخزى لبيب
٢٠١- الجانب الدينى للفلسفة	جوزايا رويس	ت: أحمد الانصار
٢٠٢- تاريخ النقد الأدبى الحديث جـ٤	رينيه ويليك	ت: مجاهد عبد المنعم مجاهد
٢٠٣- الشعر والشاعرية	الطاف حسين حالى	ت: جلال السعيد الحفناوى
٢٠٤- تاريخ نقد العهد القديم	م. سولوفيتشيك، ز. روفشوف	ت: أحمد محمود هويدى
٢٠٥- الجينات والشعوب واللغات	لويجى لوقا كافاللى- سفورزا	ت: أحمد مستجير
٢٠٦- الهيولية تصنع علما جديدا	جيمس جلايك	ت: على يوسف على
٢٠٧- ليل إفريقى	رامون خوتاسندير	ت: محمد أبو العطا عبد الرؤوف

CHAOS
Making a New Science
James Gleick

الهيولية علم جديد، ربما لم يسمع عنه بعد الأكثرية من قراء العربية. وهو علم ينتمي من الوجهة الرسمية للرياضيات، فهو فرع من فروعها. وبينما تنقسم الرياضيات عُرفًا إلى بحتة وتطبيقية، فهذا الفرع الحديث يجمع بين الجانبين. وفي جانبه التطبيقي، لم يترك مجالاً علمياً إلا وقد اقتحمه.

يتناول هذا الكتاب العلوم الآتية:-

- الرياضيات البحتة
- الفيزياء
- علم النفس
- الاقتصاد
- الفلك
- الطب
- الجيولوجيا
- الاتصالات
- علم الزلازل
- البيولوجيا والعلوم البيئية

لقد خاض مؤسسو علم الهيولية دربًا غاية في الوعورة، فصدقهم الله وعده ألا يضيع عمل المحسنين، ويكفيهم اليوم فخراً، بعد أن أحنى الكل أخيراً رؤوسهم لهم إجلالا، أن إليهم تنسب الثورة العلمية الثالثة في القرن العشرين، بعد ثورة النظرية الكمية والنظرية النسبية.